

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

CARACTÉRISATION DE LA POPULATION DE CICINDÈLES VERTES
DES PINÈDES (*CICINDELA PATRUELA PATRUELA*) À
L'ISLE-AUX-ALLUMETTES, QUÉBEC

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN BIOLOGIE

PAR
ROXANNE GAGNON

JUIN 2022

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

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

REMERCIEMENTS

C'est avec sincérité que je remercie mon comité de direction : Clint D. Kelly (UQAM), Maxim Larrivée (Insectarium de Montréal) et Michel Saint-Germain (Insectarium de Montréal). Leurs implications dans ce projet de recherche a fait une différence considérable. Ils ont su me motiver à approfondir mes connaissances et à toujours en faire davantage.

Remerciements au programme de recherche en biologie de la conservation ReNew-Zoo, ainsi qu'aux membres clés qui m'ont supportée dans ma formation et dans l'acquisition de mes connaissances : Dr. Albrecht Schulte-Hostedde, directeur du programme, ainsi que Tanis Mercer, coordonnatrice du programme.

Merci à l'Insectarium de Montréal d'avoir pris part au programme ReNewZoo et de m'avoir offert un appui irréprochable pour la planification de terrain. Sincères remerciements à Kevin Gauthier pour son aide de terrain et ses nombreuses connaissances en entomologie.

De plus, je remercie les membres du Groupe de recherche en écologie comportementale et animale (GRECA) et du Centre de la science de la biodiversité du Québec (CSBQ) pour leurs conseils, leur temps et leur expérience.

Je suis reconnaissante d'avoir reçu l'appui financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), d'Environnement et Changement Climatique Canada et de l'Insectarium de Montréal.

Au final, j'aimerais que tous les membres de ma famille sachent à quel point leurs encouragements ont été motivants et gratifiants.

DÉDICACE

Je dédie cet ouvrage, cette partie de ma vie :

À ceux qui m'ont encouragée face aux défis.

À ceux qui m'ont soutenue dans mes folies.

À ceux qui m'ont enseigné
que la biologie n'est pas que science de la vie.

Qu'elle doit être de nos acquis
pour que demain soit meilleur que survie.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	viii
RÉSUMÉ	ix
INTRODUCTION	1
0.1 Les défis de la conservation	3
0.2 La conservation chez les insectes	5
0.3 Espèce à l'étude	8
0.4 Habitat modèle	10
0.5 Objectifs et hypothèses	14
CHAPITRE I	19
1.1 INTRODUCTION	21
1.2 MÉTHODOLOGIE	24
1.2.1 Site d'étude	24
1.2.2 Capture-Marquage-Recapture	25
1.2.3 Caractérisation du micro-habitat	28
1.2.4 Analyses	29
1.3 RÉSULTATS	32
1.3.1 Système d'accouplement	35
1.3.2 Micro-habitats	36
1.4 DISCUSSION	49
1.4.1 Système d'accouplement	50
1.4.2 Micro-habitats	53

1.4.3 Limites de l'étude	56
CONCLUSION	58
RÉFÉRENCES	60

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
0.1 Répartition géographique de <i>Cicindela patruela</i> au sud-est des Grands-Lacs d'Amérique ; A) <i>Cicindela patruela patruela</i> ; B) <i>C. p. consentanea</i> ; C) <i>C. p. huberi</i> . Triangles : populations A isolées (Pearson <i>et al.</i> , 2006).	11
0.2 Répartition de <i>Cicindela patruela</i> au Canada, près des lacs Huron, Erie et Ontario. Carré : le site existant. Points : sites historiques. Triangles : sites ayant fait l'objet de relevés. (COSEPAC, 2009). .	13
1.1 Assemblage de la chambre d'anesthésie et du détendeur à CO ₂ pour la méthode de capture-marquage-recapture des Cicindèles vertes des pinèdes à l'Isle-Aux-Allumettes (Qc) à l'été 2019.	27
1.2 Patron de marquage à code numérique des Cicindèles vertes des pinèdes pour la méthode de capture-marquage-recapture effectuée à l'Isle-Aux-Allumettes (Qc) à l'été 2019. Les chiffres inscrits représentent l'endroit à rayer au crayon permanent pour rendre l'individu unique (e.g. individu #33 : élytres marqués à #20, #10, #2 et #1). Modifié de Arnold et Knisley (2018), via Watt <i>et al.</i> (1977). .	28
1.3 Mesures linéaires (mm) prises sur les individus <i>C. p. patruela</i> capturés et photographiés à l'Isle-Aux-Allumettes (Qc) à l'été 2019. Vue dorsale : Longueur de la tête (1), du pronotum (2) et des élytres (3), Largeur du pronotum (4) et d'un élytre (5).	29
1.4 Distribution géographique des individus <i>C. p. patruela</i> (19 femelles, 12 mâle) recapturés (n = 68) au cours de l'été 2019 à l'Isle-Aux-Allumettes, Qc.	34
1.5 Recaptures summary of the 31 individuals <i>C. p. patruela</i> at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019. Total of 68 captures, 19 females (F) and 12 males (M).	37

- 1.6 Sexual size dimorphism observed in *C. p. patruela* ($n=31$) at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019. Errorbars with 95% confidence interval in red. The value is in millimeters, females (F) and males (M). The length of the pronotum is the only non significant trait according to a MANOVA test. 38
- 1.7 Daily distance traveled by *C. p. patruela* females (F, $n = 9$, events = 21) and males (M, $n = 5$, events = 16) at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019. Mean is written for each sex, errorbars with 95% confidence interval in red. 39
- 1.8 Environmental variables summary for each 1 m² plot where a *C. p. patruela* was captured ($n = 62$) at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019. Mean is written for each sex, females (F) and males (M). Errorbars with 95% confidence interval in red. Value : Ground temperature (°C), bare ground (%), Litter thickness (mm), moss, grass, herb, shrub and fern are binomial variables, vegetation height (mm). There is no sex difference in the microhabitat choice according to an analysis of similarities. 40
- 1.9 Non-metric multidimensional scaling (NMDS) plot ordination performed for each capture of *C. p. patruela* ($n = 62$) at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019. Females (F) and males (M). *Stress* = 0.0268. Based on Hellinger transformation of environmental data ($y = 9$) and the Euclidean distance. Each point represents a single 1 m² plot. Non significant variables (*envfit* $p < 0.05$) has been removed : herb, fern. 41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
1.1	Multivariate analysis of variance (MANOVA) on five morphological traits measured on <i>C. p. patruela</i> individuals ($n = 31$) captured at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019.	40
1.2	Mean (\pm standard error) and coefficient of variation (CV) for four morphological traits measured on <i>C. p. patruela</i> females ($n = 19$) and males ($n = 12$) captured at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019.	41
1.3	Pearson's coefficients of correlations between five morphological traits measured on <i>C. p. patruela</i> individuals ($n = 31$), sex apart, captured at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019.	42
1.4	General linear model (GLM) showing no sex difference in number of recaptures for <i>C. p. patruela</i> individuals ($n = 31$) at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019.	43
1.5	Linear mixed-effects model (LMER) showing no sex difference in elapsed time between recaptures for <i>C. p. patruela</i> individuals ($n = 14$) at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019.	44
1.6	Linear mixed-effects model (LMER) showing no sex difference in the daily distance traveled by <i>C. p. patruela</i> individuals ($n = 14$) at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019.	45
1.7	Pearson's coefficients of correlation between the size of <i>C. p. patruela</i> individuals ($n = 14$) and their daily travelled distance at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019.	46

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

CCCEP	Conseil canadien pour la conservation des espèces en péril
CMR	Capture-marquage-recapture
COSEPAC	Comité de la situation des espèces en péril au Canada
ECCC	Environnement et Changement Climatique Canada
IAA	Isle-Aux-Alumette, Qc
UICN	Union internationale pour la conservation de la nature

RÉSUMÉ

Plus d'une espèce sur quatre évaluée par l'UICN est menacée d'extinction sur Terre en 2020. Cela représente 30 178 espèces de plantes, d'invertébrés, de poissons, de mammifères et de reptiles. Les organisations qui luttent mondialement pour sauver les espèces de l'extinction rapportent que l'augmentation croissante des pressions anthropiques menace grandement les populations. Parmi les milliers d'espèces en péril, ce n'est que depuis peu que l'on s'intéresse au déclin de l'entomofaune en biologie de la conservation. La destruction et la dégradation de l'habitat ont un sévère impact sur de nombreuses espèces, telle la Cicindèle verte des pinèdes (*Cicindela patruela* Dejean, 1825). Ce coléoptère méconnu fut désigné comme étant en voie de disparition en 2009. Au Canada, les quelques populations connues ce sont effondrées au cours des dernières décennies, à l'exception d'une seule toujours présente en Ontario. L'espèce requiert un habitat typiquement rare et fragile, soit une lande semi-ouverte de pins et de chênes au sol sec et sableux. À ce jour, les quelques rapports et articles publiés ne fournissent que des descriptions générales de l'espèce. À l'été 2016, une population anciennement éteinte a été recensée à l'Isle-Aux-Allumette, au Québec. Ainsi, notre étude de capture-marquage-recapture déterminera le système d'accouplement de l'espèce de même que ses préférences en matière d'utilisation de micro-habitat selon le sexe. La recapture des (*C. patruela* permettra de construire le profil des déplacements et de dresser le patron d'utilisation de l'habitat par les individus. Les résultats obtenus sont basés sur un petit échantillon d'individus. Ils démontrent tout de même un dimorphisme sexuel de taille dans la population, mais soutiennent que le sexe n'influence pas la distance des déplacements inter-capture. Les individus de la population de l'Isle-Aux-Allumettes se déplacent sur un petit territoire, décrit telle une pinède au sol sableux et parsemée d'une basse végétation. Les micro-habitats utilisés par les individus ne diffèrent pas selon le sexe. Cependant, ce résultat diffère entre les femelles. Il nous laisse supposer une préférence, guidée par la théorie de la distribution libre idéale, pour des micro-habitats adaptés à la ponte. Les connaissances acquises par cette étude permettent désormais de mieux orienter les efforts de conservation pour la Cicindèle verte des pinèdes.

Mots clés : Conservation ; Espèce en péril ; Coléoptère ; Compétition par brouillage ; Micro-habitat ; Capture-marquage-recapture

INTRODUCTION

L'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) est en première ligne du combat mondial pour sauver les espèces de l'extinction (UICN, 2019; UICN, 2020). Elle ajoute chaque année l'évaluation d'espèces par milliers à la Liste Rouge de l'UICN, dont 15 563 seulement en 2019 (UICN, 2020). Parmi les 112 432 espèces actuellement évaluées et répertoriées sur la Liste Rouge, plus de 25% sont menacées d'extinction dans le monde. Cela représente 30 178 espèces de plantes, d'invertébrés, de poissons, de mammifères et de reptiles (UICN, 2020). Entre 1970 et 2016, le Canada a subi un déclin de 42% de ses populations d'espèces de vertébrés, toutes évaluées en péril mondialement par l'UICN (WWF-Canada, 2020). Nombreux sont les facteurs qui menacent la survie des espèces sur Terre : la destruction de l'habitat, le développement urbain, la propagation d'espèces envahissantes, la surexploitation des ressources naturelles, le commerce illégal des espèces sauvages, la mortalité sur les routes, les perturbations anthropiques, l'activité agricole, la pollution, l'accélération des menaces liées au dérèglement climatique et l'ensemble des modifications apporté aux systèmes naturels (exploitation minière, forage pétrolier, suppression des incendies, construction de barrages) (Sanchez-Bayo et Wyckhuys, 2019; UICN, 2019; UICN, 2020; WWF-Canada, 2020; Wagner *et al.*, 2021). Une espèce en péril peut être davantage impactée par les effets en cascade et cumulatifs de ces causes que par les menaces individuelles (WWF-Canada, 2020). Par conséquent, les mesures de conservation qui ciblent une seule menace ont peu de chance de freiner et renverser les déclin des espèces, dû cette amplification de facteurs.

Les humains dépendent de nourriture, d'eau, de médicaments et d'air pur pour

survivre ; des bénéfices et services essentiels que nous procurent les écosystèmes (WWF-Canada, 2020). Par conséquent, leur dégradation a un impact sur l'ensemble des vivants de la Terre. Au sens large, la conservation consiste à éviter l'effondrement de la biodiversité écologique, où chaque espèce qui s'éteint représente une brique que l'on retire d'un mur. Il est important et nécessaire de pratiquer la conservation de la nature et des espèces qui s'y retrouvent, car les conséquences des activités anthropiques des temps modernes sont désastreuses (UICN, 2020; WWF-Canada, 2020; Wagner *et al.*, 2021).

L'attention des scientifiques et du grand public était, jusqu'à tout récemment, concentrée sur les vertébrés charismatiques, en particulier sur les mammifères et les oiseaux (McKinney, 1999; Sanchez-Bayo et Wyckhuys, 2019). Les études sur la biodiversité et la conservation sous-représentaient les insectes, malgré leur importance primordiale pour la stabilité et le fonctionnement des écosystèmes sur Terre, la pollinisation, la lutte biologique, la macro-décomposition, la formation du sol et la purification de l'eau (Hallmann *et al.*, 2017; Sanchez-Bayo et Wyckhuys, 2019; Wagner *et al.*, 2021). Ce n'est que depuis quelques décennies que les scientifiques s'intéressent plus profondément au déclin de l'abondance, de la diversité et de la biomasse des insectes (Harris *et al.*, 2019; Wagner *et al.*, 2021). Nous réalisons désormais que la biodiversité de l'entomofaune est menacée mondialement (Sanchez-Bayo et Wyckhuys, 2019). Une étude récente portant sur le déclin des coléoptères au New Hampshire, aux États-Unis, signale une diminution de 83% en abondance des captures et de 39% en biodiversité de cet ordre d'invertébré (Harris *et al.*, 2019). On mentionne que les conséquences de ce déclin sur la communauté et l'écosystème de la forêt sont pour le moment inconnues. Une chose est certaine : en raison des nombreux services écosystémiques qu'ils rendent, des impacts écologiques et économiques majeurs à l'échelle mondiale pourraient être entraînés par un déclin important des insectes (Wagner *et al.*, 2021).

0.1 Les défis de la conservation

Plus une population est petite, plus elle risque l'extinction (Chiari *et al.*, 2014). Cependant, cette problématique est complexe à étudier. Le manque de connaissances de la biologie d'une espèce est l'une des principales limites pour diagnostiquer les causes du déclin d'une population et orienter les actions de conservation de celle-ci (Johnson *et al.*, 2010; Arnold et Knisley, 2018). Un des rôles majeurs des programmes de surveillance de la faune est d'établir correctement le statut d'une population pour appliquer des actions de gestion adéquates. Cependant, l'estimation des paramètres démographiques, telles que la taille des populations et la probabilité de survie des individus, est un enjeu essentiel en biologie de la conservation (Schwarz et Arnason, 1996; McCartney *et al.*, 2006; Chiari *et al.*, 2014; Arnold et Knisley, 2018).

L'étude du système d'accouplement sexuel permet d'acquérir des informations démographiques très importantes chez une espèce (Thornhill et Alcock, 1983; Herberstein *et al.*, 2017). Emlen et Oring (1997) ont fait une classification écologique des systèmes d'accouplement, i.e. monogamie, polygynie, polygamie multiple et polyandrie, et mentionnent qu'ils sont majoritairement dictés par la façon dont les individus sont distribués dans l'habitat. La monogamie, soit un mâle pour une femelle, est présente principalement chez les populations où les individus sont très dispersés et chez qui aucun des deux sexes n'a la possibilité de monopoliser plus d'un individu. Ce système est fréquent chez les espèces aviaires, mais rare chez les mammifères (Emlen et Oring, 1977).

La polygynie renferme 3 sous-systèmes, mais se définit principalement lorsqu'un ou plusieurs mâles ont la capacité de monopoliser un groupe de femelles (Thornhill et Alcock, 1983; Herberstein *et al.*, 2017). La défense des ressources (1), où les mâles contrôlent indirectement les femelles en leur offrant l'accès à un territoire

contenant des ressources essentielles, e.g. Marmotte à ventre jaune (*Marmota flaviventris*), Indicateur à dos jaune (*Indicator xanthonotus*) (Herberstein *et al.*, 2017). La défense des femelles (2), où les mâles contrôlent directement les femelles grégaires en les maintenant sous un harem, en les protégeant et en excluant agressivement les autres mâles, e.g. nombreux ongulés et bovidés, Faisan de Colchide (*Phasianus colchicus*). La dominance des mâles (3), où les mâles ne contrôlent ni les ressources ni les femelles, mais tentent d'exhiber leur position de dominance entre eux pour être sélectionnés par une femelle, i.e. la reproduction explosive chez certains amphibiens et insectes, le lek chez certains oiseaux (Emlen et Oring, 1977; Herberstein *et al.*, 2017).

Le système de polygamie multiple survient lorsque les deux sexes ont des chances relativement égales d'améliorer leur aptitude phénotypique grâce à des reproductions multiples avec des partenaires de sexe opposé (Emlen et Oring, 1977). L'aptitude phénotypique (*fitness*), qui se calcule souvent par le succès reproducteur, est la capacité d'un individu à transmettre ses gènes aux générations futures, relativement aux autres membres de la même population ou non (Thornhill et Alcock, 1983; Jayaweera et Barry, 2017). On retrouve fréquemment ce système chez les espèces qui ont une courte saison de reproduction, e.g. Bécasseau sanderling (*Calidris alba*), Pluvier montagnard (*Charadrius montanus*) (Emlen et Oring, 1977).

La polyandrie est un système rare et qui n'est pas absolu, où une femelle s'accouple avec plusieurs mâles et où un seul est souvent responsable des soins parentaux (Emlen et Oring, 1977; Herberstein *et al.*, 2017). On y retrouve 2 sous-systèmes. La défense des ressources par les femelles (1), où elles compétitionnent et défendent des ressources nécessaires aux mâles, ainsi les monopolisant, e.g. Chevalier grivelé (*Actitis macularius*). L'accès aux femelles (2), où l'on assiste souvent aux comportements de parade nuptiale laissant le dernier choix à la femelle, e.g. *Phalaropus*

sp. (Thornhill et Alcock, 1983).

Par conséquent, des espèces soumises à des pressions écologiques similaires peuvent indépendamment évoluées vers un système d'accouplement similaire (Thornhill et Alcock, 1983). Comprendre comment une espèce se reproduit fournit des connaissances sur son comportement, mais aussi sur ses déplacements dans l'habitat. Quelle est la dynamique de dispersion des individus d'une population ? Est-ce que tous les individus se déplacent à la recherche d'un partenaire, ou bien seulement l'un des deux sexes ? Ces connaissances sont primordiales pour évaluer le statut d'une population en péril. Elles permettent d'estimer, selon le déplacement des individus, le territoire nécessaire à une population pour se reproduire et se nourrir.

La conservation d'une espèce rare est complexe, puisque les données démographiques sont souvent récoltées de manière sporadique sous forme de petits échantillons, le tout avec des méthodes différentes qui ne considèrent qu'un léger ensemble de covariables (Johnson *et al.*, 2010). Le déclin des insectes implique non seulement une diminution de l'abondance des populations, mais aussi une distribution géographique plus restreinte des espèces, un premier pas vers l'extinction (Sanchez-Bayo et Wyckhuys, 2019). Un suivi à long terme est donc essentiel pour bien comprendre le statut d'une population, même si cela ne consiste qu'en des visites annuelles avec prise de données d'occurrences (Schlesinger et Novak, 2011; Arnold et Knisley, 2018).

0.2 La conservation chez les insectes

En Allemagne, Hallmann *et al.* (2017) ont évalué l'état de l'entomofaune locale en collectant les données de biomasse des insectes volants pour 63 sites, pendant 27 ans (1989-2016). Leurs analyses estiment un déclin de 76% de la biomasse d'in-

sectes volants au cours de ces années, qui va au-delà de 82% en milieu de saison estivale. Les conditions météorologiques, l'utilisation des terres et les caractéristiques de l'habitat ne peuvent pas expliquer ce déclin global, qui est apparent peu importe le type d'habitat étudié (Hallmann *et al.*, 2017). Dans le sud du Royaume-Uni, 4 sites ont aussi fait l'étude des changements à long terme chez les insectes volants de 1973 à 2002 (Shortall *et al.*, 2009). Les pièges par aspiration (*Rothamsted Insect Survey*) ont permis d'estimer la quantité aérienne d'insectes, puis de conclure qu'un seul des quatre sites a subi un déclin significatif de la biomasse. De tels suivis entomologiques sont rares, car ils nécessitent des efforts incroyables en ce qui concerne la collecte et l'identification des spécimens.

Pour conclure plus généralement sur la biodiversité d'une région ou d'un écosystème, de nombreuses études ciblent leurs efforts sur des espèces indicatrices, comme les coléoptères de la sous-famille des *Cicindelinae* (Pearson et Vogler, 2001; Schlesinger et Novak, 2011; Sanchez-Bayo et Wyckhuys, 2019). Puisque nous connaissons bien ces espèces et leur distribution géographique passée et présente, il est possible d'évaluer les tendances historiques de déclin pour leur aire de répartition ou leur abondance (Pearson *et al.*, 2015). Au Canada et aux États-Unis, 15% des espèces de cicindèles sont menacées d'extinction (Pearson *et al.*, 2015). En général, les causes proviennent de la destruction et la modification de l'habitat, l'intensification de l'agriculture, l'urbanisation, la collecte de spécimens et l'altération des processus naturels comme les feux et les inondations (Sanchez-Bayo et Wyckhuys, 2019). Il est très délicat de faire l'inventaire de coléoptères menacés, car la non-détection ne signifie pas l'absence d'individus (Schlesinger et Novak, 2011). Certaines espèces rares de cicindèles se retrouvent souvent dans des lieux naturellement hétérogènes, où leur répartition est limitée en raison de leur faible abondance et de leurs préférences en matière de micro-habitats. Procéder à une estimation de la taille des populations chez les espèces rares, telles la Cicindèle des

galets (*Cicindela marginipennis* Dejean, 1831) et la Cicindèle verte des pinèdes (*C. patruela* Dejean, 1825), serait souhaitable, voire essentiel, malgré la détection imparfaite des individus (Schlesinger et Novak, 2011).

La Cicindèle des galets est aux prises avec de nombreuses menaces, pour ne mentionner que la modification des berges, l'utilisation de véhicules tout-terrain et la fragmentation de l'habitat (ECCC, 2013). L'espèce est considérée comme *vulnérable* selon la Liste Rouge de l'UICN depuis 2013. Comme c'est le cas pour bien des espèces rares de cicindèles, la distribution géographique de *C. marginipennis* est très grande. Cependant, les populations sont petites, souvent de 100 individus et moins, et réparties parmi les quelques zones adaptées qui subsistent encore (Hudgins *et al.*, 2011; ECCC, 2013; Kinsley, 2014). On retrouve la Cicindèle des galets aux États-Unis (Alabama, Indiana, Kentucky, Maine, Massachusetts, New Hampshire, New Jersey, New York, Ohio, Pennsylvanie et Virginie-Occidentale) et au Canada (Nouveau Brunswick et Nouvelle-Écosse). Malgré ce grand territoire, l'aire d'occupation de l'espèce ne représente que 120 km², répartie en 10 localisations (Kinsley, 2014). Afin de planifier des mesures de conservation, une étude de capture-marquage-recapture a été pratiquée sur la Cicindèle des galets pour estimer la distance de dispersion le long de la rivière Genesee à Rochester, New York (Hudgins *et al.*, 2011).

Ce type de méthode a aussi été pratiquée chez *C. ohlone* en 2002, une espèce en péril que l'on retrouve seulement dans le comté de Santa Cruz, en Californie (Arnold et Knisley, 2018). Elle est désormais subdivisée en 5 petites populations (15 populations en 2001 selon Pearson *et al.* (2015)) et dépend d'un sol nu pour se nourrir, se reproduire et pondre (Cornelisse *et al.*, 2013). Quatre des populations de Santa Cruz ont fait l'objet d'une étude à long terme, entre 2000 et 2017, pour estimer la taille des populations à l'aide de données d'occurrences, i.e. comptes visuels (Arnold et Knisley, 2018). Les études concluent que les activités anthro-

priques ont eu pour impact d'éliminer les perturbations naturelles, tels le pâturage par des ongulés et les feux, tous deux servant à maintenir un habitat favorable pour l'espèce (Cornelisse *et al.*, 2013; Pearson *et al.*, 2015; Arnold et Knisley, 2018).

Tout comme la *Cicindela ohlone*, le nombre de populations de *C. patruela* a chuté au cours des dernières décennies en Amérique du Nord (Pearson *et al.*, 2006; Schlesinger et Novak, 2011; ECCC, 2016). Le Parc Provincial de Pinery en Ontario préservait jusqu'à tout récemment la seule population restante au Canada. Le parc pratique annuellement des comptes visuels afin d'établir le statut de la population pour de futures mesures de conservation (Pinery Provincial Park, 2019a). Les besoins en recherche biologique pour cette espèce requièrent principalement une description de l'habitat, incluant les stades larvaires, et une étude de CMR pour déterminer le patron de mouvements des adultes (NatureServe Explorer, 2009). Il est essentiel d'étudier les stades larvaires et adultes pour bien comprendre les tendances d'une population et pour mettre en œuvre des stratégies de conservation (Arnold et Knisley, 2018).

0.3 Espèce à l'étude

La présente étude porte sur la Cicindèle verte des pinèdes (*C. patruela*), une espèce en péril que l'on retrouve uniquement dans l'est de l'Amérique du Nord et dont la survie dépend de son habitat : une savane de pins et de chênes au sol sablonneux (COSEPAC, 2009). Elle obtient le statut «En voie de disparition» en 2009 par le COSEPAC, fut inscrite en 2012 à l'annexe 1 de la Loi sur les espèces en péril (Government Canada, 2019), puis elle a été classée N1 - Gravement en péril - en

2015 (CCCEP, 2015).

La Cicindèle verte des pinèdes est un insecte de 12 à 14 mm caractérisé par ses élytres et son abdomen vert métallique terne (Pearson et Vogler, 2001; Pearson *et al.*, 2006; Evans, 2014). Elle est très voyante lorsque posée sur le sable clair, mais peut fuir très rapidement ses prédateurs pour se camoufler dans les herbes. Ses longues pattes ne lui permettent pas de se déplacer aisément et de chasser dans la végétation (Pearson *et al.*, 2006).

En général, les adultes *C. patruela* sont actifs d'avril à juillet, puis d'août à octobre pour la seconde cohorte (COSEPAC, 2009). Les Cicindèles vertes des pinèdes subissent une métamorphose complète, i.e. holométabole (CCCEP, 2015). Cette espèce a un cycle de vie de 2 ans, qui débute par un oeuf pondu dans un sable compact et stable (profondeur : 3 à 5 mm) vers la mi-juillet (Knisley *et al.*, 1990; COSEPAC, 2009). Les larves éclosent quelques jours plus tard, puis creusent un tunnel à l'emplacement de la ponte — lieu sélectionné par la femelle — afin de s'abriter, de croître et de chasser (Pearson *et al.*, 2006; COSEPAC, 2009). Elles traversent 3 stades larvaires au cours de l'année qui suit. La nymphose survient à la fin du 2e été [août-septembre] chez les populations du sud, où l'adulte émerge, chasse, puis retourne sous terre pour un deuxième hiver (COSEPAC, 2009). Il émerge à nouveau au printemps suivant pour se reproduire et termine sa vie au cours de l'été. Chez les populations plus nordiques, la nymphose survient généralement au début du troisième été (Pearson *et al.*, 2006), alors que l'individu a passé environ 22 mois sous terre. Il est probable que les températures plus fraîches empêchent l'émergence automnale hâtive des nouveaux adultes (Knisley *et al.*, 1990; Pearson *et al.*, 2006).

La Cicindèle verte des pinèdes, tous stades confondus, est la proie d'asiliidés, de mammifères, de reptiles et d'oiseaux, mais elle est aussi un prédateur généraliste

agile des petits invertébrés et des fourmis (COSEPAC, 2009).

0.4 Habitat modèle

Nous en connaissons peu sur l’habitat précis de la Cicindèle verte des pinèdes. L’espèce utilise les zones anthropiques défrichées, telles que les sentiers de randonnée, les zones de restauration, les carrières de sable, les clairières de grès érodés ainsi que les sols parsemés de lichens, de mousses ou de très courtes végétations (Pearson *et al.*, 2006; Schlesinger et Novak, 2011; Evans, 2014). Principalement, les ouvrages décrivent l’habitat de ce coléoptère comme un lieu sec, sableux, semi-ouvert et faible en végétation, caractéristique des savanes de pins et de chênes (Knisley *et al.*, 1990; Pearson *et al.*, 2006; COSEPAC, 2009; Schlesinger et Novak, 2011; ECCC, 2016)

La Cicindèle verte des pinèdes partage son habitat avec d’autres espèces de *Cicindelinae* plus communes et généralistes telles la Cicindèle à six points (*C. sexguttata* Fabricius, 1775), la Cicindèle à taches latérales (*C. scutellaris* Say, 1823) ainsi qu’avec la Cicindèle à grande lèvre (*C. longilabris* Say, 1824) (Pearson *et al.*, 2006).

On retrouve la Cicindèle verte des pinèdes au sud de l’Ontario ainsi que dans 17 États au nord-est des États-Unis (Voir Figure 0.1), mais uniquement en petites populations isolées et discontinues (Pearson *et al.*, 2006; NatureServe Explorer, 2009). *C. patruela patruela* est la sous-espèce qui couvre la plus grande partie de la répartition, alors que 2 autres sous-espèces (*C. p. consentanea* et *C. p. huberi*) se situent respectivement du New Jersey au Delaware et au sud-ouest du Wisconsin (Willis, 2001; Pearson *et al.*, 2006).

Les sites d’occurrences de la Cicindèle verte des pinèdes semblent être le reflet de

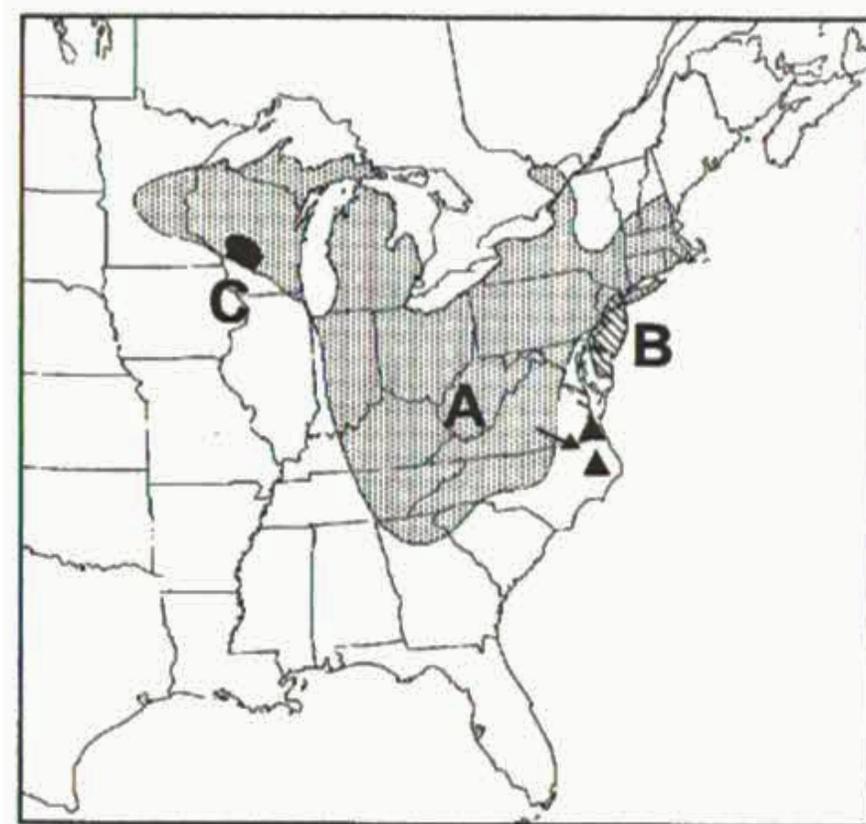


Figure 0.1: Répartition géographique de *Cicindela patruela* au sud-est des Grands-Lacs d'Amérique; A) *Cicindela patruela patruela*; B) *C. p. consentanea*; C) *C. p. huberi*. Triangles : populations A isolées (Pearson *et al.*, 2006).

la dispersion postglaciaire le long des vallées fluviales, du climat et du type de sol (COSEPAC, 2009). Au Canada, cette dispersion postglaciaire est maintenant caractérisée par des microclimats plus doux, des sols alluvionnaires sableux et une couverture végétale typique des dunes boisées et des landes sableuses (COSEPAC, 2009). La dispersion des individus de *C. patruela* vers le Nord est limitée par le climat plus froid et les sols granitiques peu profonds (COSEPAC, 2009). Dans les dernières années, plusieurs habitats de prédilection ont été investigués au Canada à la recherche de l'espèce (Voir Figure 0.2). En 2009, l'unique population de Cicindèles vertes des pinèdes encore présente au pays se trouvait dans une petite portion du Parc Provincial Pinery, en Ontario, où aucun inventaire complet n'a

été mené jusqu'ici. Plusieurs autres zones ont été inventoriées, tels le secteur de la baie Constance (site historique), l'ensemble du Parc Provincial Pinery et les zones adjacentes, les dunes d'arrière-plage de Wasaga, les plaines de Turkey Point, la station forestière St. Williams, et autres (COSEPAC, 2009). Historiquement, la seule observation québécoise de l'espèce a eu lieu à l'Isle-Aux-Allumettes en 1980, aux abords de la rivière des Outaouais (ECCC, 2016). Depuis cette capture, la majeure partie de l'isle a été convertie en terres agricoles, ou fut laissée à elle-même pour en devenir densément boisée (COSEPAC, 2009). L'insuccès de ces efforts de recherches entomologiques autour du Parc Provincial Pinery démontre l'extrême rareté de l'espèce (COSEPAC, 2009).

À l'été 2016, une population de *C. patruela patruela* a été découverte à l'Isle-Aux-Allumette (IAA), Québec, Canada (Saint-Germain, 2017). Mon projet de recherche poursuit cette importante découverte et vise à caractériser cette nouvelle population et son habitat afin de planifier d'éventuelles actions de conservation. Actuellement, nous ne possédons aucune donnée précise pour cette nouvelle population de Cicindèles vertes des pinèdes ; ni pour celle du Parc Provincial Pinery (COSEPAC, 2009), ni pour d'autres aux États-Unis (Knisley *et al.*, 1990; Mawdsley, 2005; Schlesinger et Novak, 2011). L'espèce est en déclin et de nombreuses lacunes sont à combler avant que des mesures de conservation efficaces puissent être mises en place. Des données concernant sa démographie (taille de population, morphologie des individus), son comportement (patron de déplacements, reproduction) et son habitat essentiel (site de ponte, développement larvaire, domaine vital des adultes) doivent être acquises (NatureServe Explorer, 2009; Schlesinger et Novak, 2011; Chiari *et al.*, 2014) (Voir section suivante).

L'aire d'étude de l'IAA est basée sur un sol de la série Ivry, dont le drainage est excessif. À cet endroit, on retrouve 2 types de sols, soient un sable fin (I) et un sable fin érodé par le vent (Ie) (Lajoie, 1962a; Duchesne et Charlebois, 2013; Tellier

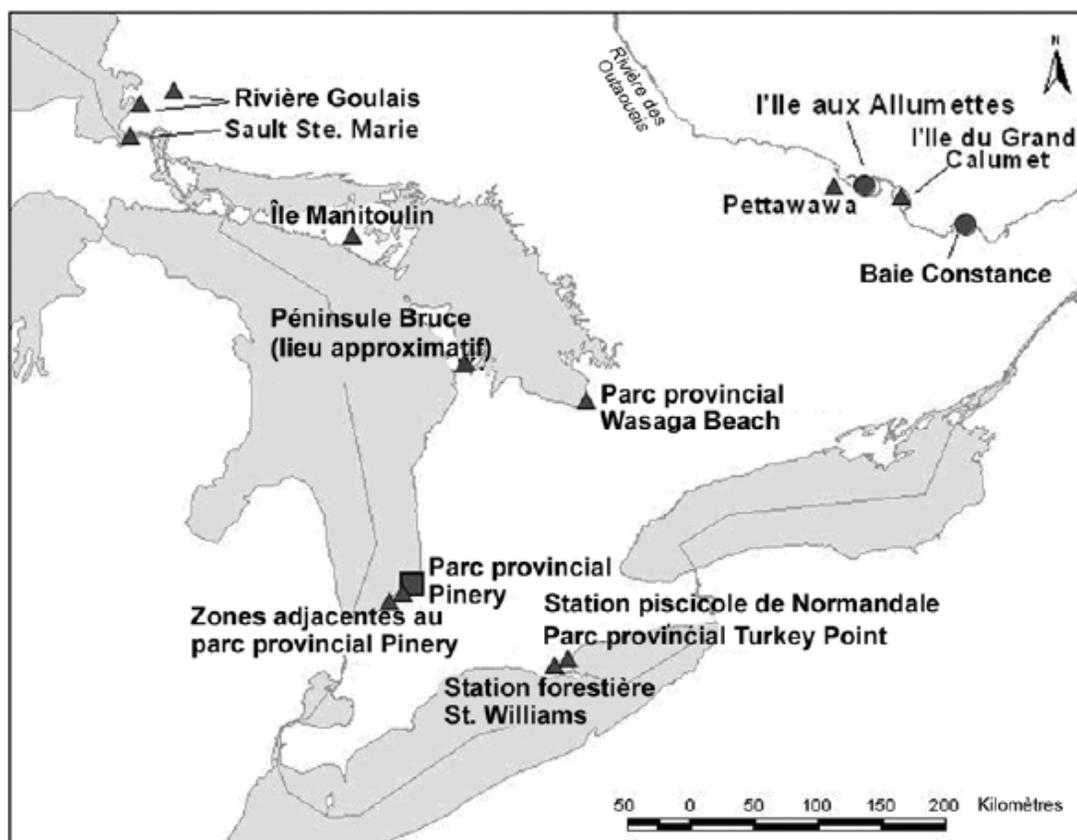


Figure 0.2: Répartition de *Cicindela patruela* au Canada, près des lacs Huron, Erie et Ontario. Carré : le site existant. Points : sites historiques. Triangles : sites ayant fait l'objet de relevés. (COSEPAC, 2009).

et Charlebois, 2013). Cet emplacement légèrement vallonné (pentes irrégulières de 16-30%) repose sur un matériau originel composé de sable et exempt de pierre. La roche-mère est un assemblage de dunes de sable formées par des dépôts éoliens, dont certains mesurent plus de 20 pieds de profondeur (Lajoie, 1962a). Le premier horizon, i.e. couche, d'un sol Ivry peut être composé de dépôts de litière, mais dans l'ensemble, tous les horizons sont composés de sable (Lajoie, 1962b).

La composition forestière établie sur un sol Ivry à drainage excessif est généralement composée du pin blanc (*Pinus strobus*), du pin rouge (*Pinus resinosa*), du pin gris (*Pinus bankiana*), de l'épinette blanche (*Picea glauca*), du sapin baumier

(*Abies balsamea*), du peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*), du bouleau blanc (*Betula papyrifera*), de l'érable rouge (*Acer rubrum*) et du chêne rouge (*Quercus rubra*) (Lajoie, 1962b). Les sols Ivry sont pauvres, puisqu'ils sont arides et peu fertiles (Lajoie, 1962b). De plus, l'étude mentionne qu'ils se réchauffent rapidement au printemps et sont facilement soumis à l'érosion éolienne. Le sol du site d'étude de l'IAA est le résultat de centaines d'années d'accumulation de dépôts fluviaux et éoliens de sable, le même processus que celui observé au Parc Provincial Pinery (Pinery Provincial Park, 2019a). Les vagues de la rivière des Outaouais ont réuni des bois flottants et autres objets en un endroit, le même phénomène qu'au Parc Provincial Pinery (2019a, 2019b). Les dunes de sable en bordure de l'isle sont formées par le dépôt de grains de sable dans l'eau, i.e. dépôt fluviaux, tandis que les dunes paraboliques sont formées par le sable transporté à l'intérieur de l'isle par le vent, i.e. dépôt éolien (Pinery Provincial Park, 2019a). La végétation s'est installée sur les dunes plus anciennes et les a solidifiées. Au fil des décennies, ces sites deviennent des prairies, des savanes, puis des forêts, suivant la succession écologique. Il fut affirmé de nouveau que l'entièreté du site d'étude de l'IAA est basée sur des dépôts sableux (Saint-Germain, 2017). Seul ce type de sol, couvert d'un peuplement forestier ouvert et dominé par le pin ou le chêne, convient au maintien de l'espèce *C. patruela* (COSEPAC, 2009; Saint-Germain, 2017).

0.5 Objectifs et hypothèses

L'objectif principal de cette étude est de caractériser la nouvelle population de *C. p. patruela* découverte sur l'IAA ainsi que l'habitat où elle se retrouve. Ce gain de connaissances permettra d'entreprendre plus amples actions de conservation, de même que la conception d'un programme de rétablissement pour la Cicindèle

verte des pinèdes pour le sud-ouest du Québec et ailleurs.

Je caractériserai la population de *C. p. patruela* de l'IAA par la méthode de capture-marquage-recapture (CMR). J'étudierai 1) son système d'accouplement sexuel pour déterminer i) la présence d'un dimorphisme sexuel de taille et ii) le déplacement des individus selon leur sexe et 2) l'utilisation de micro-habitats différents selon le sexe des individus.

0.5.1 Système d'accouplement

Pour bien planifier les mesures de conservation de la Cicindèle verte des pinèdes, nous devons déterminer son système d'accouplement (Emlen et Oring, 1977; Thornhill et Alcock, 1983; Herberstein *et al.*, 2017). Chez les insectes, 2 grands systèmes sont fréquents, soit la compétition par territorialité des mâles (i.e. polygynie), ou bien la compétition par brouillage (i.e. polygamie multiple) (Thornhill et Alcock, 1983; Herberstein *et al.*, 2017). Le premier système implique des mâles qui sont généralement plus grands que les femelles. Ceux-ci acquièrent des traits sexuels secondaires d'armement et compétitionnent entre eux pour l'accès aux femelles selon les sous-systèmes abordés précédemment (Emlen et Oring, 1977; Thornhill et Alcock, 1983; Herberstein *et al.*, 2017). Le second système définit que le succès reproducteur des mâles est déterminé par la rapidité et l'efficacité à localiser les femelles dans l'environnement (Jayaweera et Barry, 2017). Il implique normalement des femelles plus grandes que les mâles (Thornhill et Alcock, 1983; Schwagmeyer, 1988; Jayaweera et Barry, 2017). Elles sont solitaires et dispersées dans l'habitat, ce qui encourage la recherche de partenaires par les mâles, sans agressivité (Jayaweera et Barry, 2017). Ceux-ci investissent donc dans leur mobilité, leur système sensoriel et leur mémoire spatiale, e.g. Spermophile rayé (*Spermophilus tridecemlineatus*) (Schwagmeyer, 1988), Fausse mante de jar-

din (*Pseudomantis albofimbriata*) (Jayaweera et Barry, 2017). Chez les cicindèles, lorsqu'un mâle trouve une femelle, il monte sur son dos et l'agrippe au thorax et aux élytres (Pearson *et al.*, 2006). La fertilisation interne des oeufs n'a lieu que si le mâle n'est pas éjecté par sa partenaire. Le mâle reste en position de garde, parfois pendant plusieurs heures, pour éviter que d'autres mâles ne fertilisent les oeufs après leur départ (Pearson *et al.*, 2006).

Plusieurs études mentionnent qu'il y a chez certaines espèces du genre *Cicindela* un dimorphisme sexuel de taille en faveur des femelles (Kritsky et Simon, 1995; Jaskula, 2005; Pearson et Vogler, 2001). De plus, plusieurs rapports supposent que les femelles *C. p. patruela* défendent un petit territoire adapté à la ponte de leurs œufs (Pearson *et al.*, 2006; COSEPAC, 2009; Brust *et al.*, 2012). Par conséquent, les femelles verraient leurs déplacements diminués en nombre et en distance, restreignant ainsi leur domaine vital durant la saison de reproduction (Thornhill et Alcock, 1983). Au cours de cette période, les mâles se dispersent sur un plus grand territoire à la recherche de partenaires dans l'objectif d'augmenter leur succès reproducteur (Schwagmeyer, 1988).

La connaissance du système d'accouplement chez la Cicindèle verte des pinèdes de l'IAA permettra d'adapter, puis d'appliquer les mesures de conservation à l'ensemble des populations. Connaître la dynamique de dispersion des individus dans l'habitat permettra de déterminer la quantité et l'étendue de leurs déplacements, pour mieux centrer nos efforts sur la zone utilisée par l'espèce. Je suppose que *C. p. patruela* pratique un système d'accouplement de compétition par brouillage. Je prédis que les femelles seront plus grandes et moins mobiles que les mâles. L'hypothèse alternative serait que la Cicindèle verte des pinèdes pratique un système d'accouplement par territorialité des mâles. Nous observerons alors des mâles plus grands ou de taille similaire aux femelles, qui se déplacent moins qu'elles dans l'habitat, i.e. polygynie.

0.5.2 Micro-habitats

Connaître la morphologie et le comportement d'une espèce ne suffisent pas pour mettre en place des mesures de conservation. Il est essentiel de déterminer l'habitat d'une espèce en voie de disparition, par ailleurs lorsque cet habitat est lui-même rare et fragile (Willis, 2001; COSEPAC, 2009; NatureServe Explorer, 2009; Pinery Provincial Park, 2019b). Une lande de pins et de chênes est un territoire très hétérogène, offrant des micro-habitats aux conditions particulières (Schlesinger et Novak, 2011). Nous savons que les cicindèles utilisent différents types de parcelles selon leur comportement, i.e. quête de nourriture, thermorégulation, ponte, repos, etc. (Knisley *et al.*, 1990; Schultz, 1998; Pearson *et al.*, 2015). Je me questionne à savoir si les individus ont des préférences en matière de micro-habitats, d'autant plus, à savoir s'il y a une différence entre les femelles et les mâles. La recapture des *C. p. patruela* me permet de déterminer le profil des micro-habitats utilisés par les individus de la population de l'IAA au cours de leurs activités journalières.

Hypothétiquement, les femelles se déplacent moins dans l'habitat dû au système d'accouplement. En quête de partenaires, les mâles en déplacement se posent au sol afin de subvenir à leurs besoins de base (repos, thermorégulation, chasse et fuite) entre deux reproductions (Pearson *et al.*, 2006). Selon moi, les femelles subviennent aux mêmes besoins tout en restant près des sites de ponte adaptés, qu'elles testent avec leurs antennes et mandibules avant de pondre, i.e. selon la texture du sol, la salinité, la pente, l'humidité et la température (Pearson *et al.*, 2006). Je suppose que le micro-habitat utilisé diffère selon le sexe des individus *C. p. patruela*. Je prédis que les micro-habitats des individus femelles sont similaires, répondant aux besoins de la ponte. À l'inverse, je prédis que les micro-habitats des individus mâles seront très aléatoires, étant donné leurs déplacement dans l'habitat en quête de femelles. Alternativement, les 2 sexes seront capturés dans

des micro-habitats similaires ; une situation que je présente dans la discussion.

CHAPITRE I

CARACTÉRISATION DU SYSTÈME D'ACCOUPLLEMENT ET DE L'HABITAT CHEZ LA POPULATION DE *Cicindela patruela patruela* À L'ISLE-AUX-ALLUMETTES, QUÉBEC

Roxanne Gagnon¹, Maxim Larrivée², Michel Saint-Germain² et Clint D. Kelly¹

1. Département des Sciences Biologiques, Université du Québec à Montréal, Québec, Canada

2. Insectarium de Montréal / Espace pour la vie, Québec, Canada

RÉSUMÉ

Nous luttons pour la conservation des espèces en péril depuis de nombreuses décennies afin d'éviter l'effondrement de la biodiversité écologique. Les insectes sont d'une importance primordiale pour la stabilité et le fonctionnement des écosystèmes sur Terre. La Cicindèle verte des pinèdes (*Cicindela patruela* Dejean, 1825) est un coléoptère méconnu en voie de disparition depuis 2009 au Canada. Elle est menacée par la destruction et la détérioration de son habitat : les landes semi-ouvertes de pins et de chênes au sol sec et sablonneux. À l'été 2016, une seconde population canadienne de *C. p. patruela* a été découverte à l'Isle-Aux-Allumettes, Québec. À ce jour, les quelques rapports et articles publiés ne fournissent que des descriptions générales de l'espèce. Mon étude de capture-marquage-recapture a pour objectif de combler le manque de connaissances démographiques, comportementales et environnementales de *C. p. patruela*. Nous supposons, premièrement, que l'espèce pratique un système d'accouplement par compétition de brouillage, décrit par la présence de femelles plus grandes et moins mobiles que les mâles et deuxièmement, que les micro-habitats utilisés par un individu diffèrent selon son sexe. Les recaptures permettent de construire le profil des déplacements et de dresser un patron des habitats utilisés. Un dimorphisme sexuel de taille avantage significativement les femelles dans la population de l'Isle-Aux-Allumettes. La fréquence de recapture ne diffère pas chez les 2 sexes, tout comme le délai entre 2 captures consécutives et la distance quotidienne parcourue par un individu. Les micro-habitats utilisés par les individus ne diffèrent pas selon le sexe aux emplacements de capture. Cependant, nous distinguons une préférence en matière de micro-habitats entre les femelles. On peut l'expliquer par la théorie de la distribution libre idéale, où certaines choisissent des sites de ponte sans doute moins favorables, mais où la compétition pour les ressources est moindre. L'ensemble des résultats présentés a une retombée majeure pour la conservation de l'espèce *C. p. patruela*. Un suivi à long terme de la population de l'Isle-Aux-Allumettes, une analyse démographique et environnementale des stades larvaires, de même qu'une étude plus axée sur le comportement des adultes vis-à-vis leur utilisation de l'habitat sont nécessaires pour bien entreprendre des mesures de conservation pour la *C. p. patruela*.

Mots clés : Conservation ; Espèce en péril ; Coléoptère ; Compétition par brouillage ; Micro-habitat ; Capture-marquage-recapture

1.1 INTRODUCTION

Sur Terre, plus de 1 espèce sur 4 est menacée d’extinction. Cela représente 30 178 espèces menacées de plantes, d’invertébrés, de poissons, de mammifères et de reptiles sur l’ensemble de celles répertoriées sur la Liste Rouge, i.e. 112 432 espèces (UICN, 2019; UICN, 2020). Les programmes de surveillance des espèces en péril permettent d’acquérir les connaissances nécessaires, telles des données démographique et d’habitat, afin de planifier des actions de conservation (Schwarz et Arnason, 1996; McCartney *et al.*, 2006; Johnson *et al.*, 2010; Arnold et Knisley, 2018). L’étude du système d’accouplement est essentielle dans ces situations, car il nous renseigne sur les comportements et les déplacements des individus dans l’habitat (Emlen et Oring, 1977; Thornhill et Alcock, 1983; Herberstein *et al.*, 2017).

Ce n’est que depuis quelques années que les scientifiques s’intéressent plus sérieusement au déclin de l’abondance, de la diversité et de la biomasse de l’entomofaune (Harris *et al.*, 2019; Sanchez-Bayo et Wyckhuys, 2019; Wagner *et al.*, 2021). La destruction de l’habitat, la déforestation, la fragmentation, l’urbanisation, l’agriculture et les changements climatiques sont les plus grandes causes du déclin des populations d’insectes (UICN, 2020; WWF-Canada, 2020). Des impacts écologiques et économiques importants à l’échelle mondiale résulteront d’une perte importante de la faune entomologique (Wagner *et al.*, 2021).

Pour une espèce en péril, la perte de son habitat la rapproche de l’extinction. Certains types d’habitats se font de plus en plus rares, principalement dus aux activités anthropiques (Wagner *et al.*, 2021). L’une des dernières savanes de pins et de chênes est encore présente au Parc Provincial Pinery, en Ontario, où tout juste 25 km² abrite de nombreuses espèces d’animaux en voie de disparition (Pinery Provincial Park, 2019a). On y retrouve la Cicindèle verte des pinèdes (*Cicindela*

patruela Dejean, 1825), qui était jusqu'à tout récemment la seule population restante au Canada (COSEPAC, 2009; ECCC, 2016; Pinery Provincial Park, 2019a). Au travers cette lande aux paysages hétérogènes, cette espèce est reconnue pour utiliser des micro-habitats qui présentent des conditions uniques. Spécialiste et dépendante de ce rare habitat, *C. p. patruela* a été déclarée en voie de disparition en 2009 au Canada (COSEPAC, 2009), puis fut inscrite à l'annexe 1 de la Loi sur les espèces en péril en 2012 (Government Canada, 2019). En 2015, elle a été classée N1 - Gravement en péril - dû à l'augmentation des menaces à sa survie (CCCEP, 2015).

Le déclin de la Cicindèle verte des pinèdes est principalement dû à la perte de son habitat, notamment par la suppression des feux de forêt, la foresterie et le compactage (ECCC, 2016). Cet insecte nécessite un habitat sec, sableux, semi-ouvert et faible en végétation, caractéristique des savanes de pins et des chênes (Pearson *et al.*, 2006; COSEPAC, 2009; Schlesinger et Novak, 2011; ECCC, 2016). La répartition géographique de cette espèce est limitée à l'Amérique du Nord. Elle est encore présente dans quelques États au nord-est des États-Unies, toujours en petites populations isolées (Pearson *et al.*, 2006; NatureServe Explorer, 2009).

À l'été 2016, une nouvelle population de *C. p. patruela* a été découverte à l'Isle-Aux-Allumettes (IAA), au Québec (Saint-Germain, 2017). C'est la seule sous-espèce de Cicindèle verte des pinèdes présente au Canada (Pearson *et al.*, 2006). Elle est au coeur de mon étude, qui vise à combler un grand manque de connaissances chez l'espèce. Principalement inspirée par l'étude d'un coléoptère rare (Arnold et Knisley, 2018), j'utilise une méthode de capture-marquage-recapture (CMR) pour répondre à des hypothèses démographiques, comportementales et environnementales. Cette méthode me permettra de photographier et de marquer les individus afin d'estimer la taille de la population de l'IAA, la dynamique de dispersion des adultes ainsi que leurs préférences pour certains types de micro-

habitats au moment de la capture. Pour l'instant, peu d'études ont été faites sur la conservation de la *C. p. patruela* (Schlesinger et Novak, 2011; Saint-Germain, 2017). Autre que les descriptions générales de la morphologie et de l'habitat de l'espèce (Knisley *et al.*, 1990; Pearson *et al.*, 2006; COSEPAC, 2009; ECCC, 2016), j'ai pu acquérir aucune donnée précise pouvant se comparer aux résultats de mon étude.

Comme pour la majorité des cicindèles, je suppose que 1) la *C. p. patruela* utilise un système de reproduction par compétition de brouillage (Kritsky et Simon, 1995; Jaskula, 2005; Pearson et Vogler, 2001). Il définit que le succès reproducteur d'un mâle est déterminé par la rapidité et l'efficacité à localiser les femelles dans l'environnement et que sa capacité à se déplacer rapidement lui fournit un avantage, relativement aux autres mâles (Jayaweera et Barry, 2017). Ce type d'accouplement prédit que les femelles sont plus grandes et moins mobiles que les mâles (Thornhill et Alcock, 1983; Schwagmeyer, 1988; Jayaweera et Barry, 2017). Les femelles restent à proximité des sites favorables à la ponte des oeufs (Brust *et al.*, 2012; Pearson *et al.*, 2015). Je prédis donc que les mâles se déplacent davantage dans l'habitat et que les femelles sont de plus grande taille.

Je suppose que 2) le micro-habitat utilisé par un individu varie en fonction de son sexe. Les individus exploitent des micro-habitats différents selon leur comportement, i.e. ponte, repos, chasse, thermorégulation (Knisley *et al.*, 1990; Schultz, 1998; Pearson *et al.*, 2006). Puisque les femelles investissent beaucoup dans la recherche de sites de ponte adaptés, i.e. texture du sol, salinité, humidité et température (Pearson *et al.*, 2006), je prédis qu'elles utilisent des micro-habitats semblables entre elles. Je prédis que le choix du micro-habitat chez les mâles est aléatoire pour les parcelles au sol, car ils se déplacent en quête de partenaires et se posent uniquement pour subvenir à leurs besoins. Je considère que l'endroit où un individu est capturé représente le micro-habitat qu'il utilisait à ce moment.

1.2 MÉTHODOLOGIE

1.2.1 Site d'étude

L'Isle-Aux-Allumettes est située au Québec, au coeur de la rivière des Outaouais. Cette isle compte 1334 habitants pour une superficie de 186 km² (7.2 hab/km²) (Municipalité de l'Isle-Aux-Allumettes, 2017). L'utilisation du territoire est de 3% urbaine, 38% agricole et 58% forestière. Les zones végétales de l'IAA varient entre des forêts (11.8% résineuses, 27.6% feuillues, 60.6% mixtes), des plantations, des milieux humides et des marais (Duchesne et Charlebois, 2013; Tellier et Charlebois, 2013). Le site d'étude se situe en terres privées, qui représente seulement une petite partie de l'isle (*Coordonnées non disponibles*). La période de terrain s'est échelonnée du 14 mai au 11 juillet 2019 et du 6 au 8 août 2019, pour 23 jours de capture.

Le site d'étude est particulièrement adapté aux besoins de *C. p. patruela* dû à son sol de la série Ivry composé essentiellement de sable fin érodé par le vent (Lajoie, 1962a; Duchesne et Charlebois, 2013; Tellier et Charlebois, 2013; Saint-Germain, 2017). Sa roche-mère, exempte de roches, est en réalité un assemblage de dunes de sable formées par des dépôts éoliens, certains faisant plus de 6 mètres (Lajoie, 1962a). Selon l'étude de Lajoie (1962b), les sols Ivry sont caractérisés comme étant pauvres, arides et peu fertiles. Ces sols sont reconnus pour se réchauffer rapidement au printemps et pour être facilement soumis à l'érosion éolienne (Lajoie, 1962b). Sans aucun potentiel agricole, ce site est principalement constitué de pins gris (*Pinus bankiana*), de pins rouges (*Pinus resinosa*) et de peupliers à grandes dents (*Populus grandidentata*) (Lajoie, 1962b).

1.2.2 Capture-Marquage-Recapture

J'ai mis sur pied une technique de CMR adaptée à la biologie de *C. p. patruela* et inspirée d'études qui portent sur des espèces rares de coléoptères afin d'estimer la taille de population de l'IAA, de quantifier les déplacements des individus et de caractériser leurs choix de micro-habitats (Knisley *et al.*, 1990; Chiari *et al.*, 2014; Campanaro *et al.*, 2016; Arnold et Knisley, 2018). Les inventaires se déroulaient entre 9h et 16h ; du moment où la température du sol était supérieure à 19°C pour permettre l'activité des adultes (Knisley *et al.*, 1990; COSEPAC, 2009; ECCC, 2016). J'ai procédé aux captures seulement lors des journées ensoleillées, puisque l'on détecte mieux les cicindèles avec les rayons du soleil (obs. pers.). Aussi, *C. p. patruela* est peu active lors des journées nuageuses et ainsi, elle est plus difficile à détecter (Knisley *et al.*, 1990).

L'inventaire s'est déroulé le long de sentiers récréatifs qui traversent l'habitat de la population. Cela totalise 90 km linéaires sur une largeur qui varie entre 2 m et 3 m. Afin d'éviter un biais d'échantillonnage et ne parcourir que les sentiers déjà aménagés, nous avons aussi inventorié 12 transects forestiers faisant chacun 1 km nord-sud sur une largeur de 2 m (Arnold et Knisley, 2018). Ils sont disposés uniformément dans le site d'étude, espacés de 150 mètres et traversent à quelques endroits la zone d'habitat potentiel de *C. p. patruela* sur l'IAA ainsi que les sentiers aménagés (Saint-Germain, 2017). En tout temps, 2 observateurs marchent côte à côte (Chiari *et al.*, 2014), à une vitesse qui varie entre 1 et 4 km/h, i.e. marche lente (Arnold et Knisley, 2018), selon la difficulté de détection au sol. La capture des cicindèles est faite à l'aide d'un filet entomologique (Diamètre : 30 cm ; Longueur : 122 cm). Pour l'analyse du micro-habitat, un drapeau de marquage portant le numéro d'identification de l'individu (#Individu.#Recapture) est planté au sol à l'endroit où la cicindèle a été aperçue en premier, si plusieurs tentatives de

capture surviennent. Pour chaque capture, les données suivantes sont notées : date, heure, coordonnées GPS (*Garmin eTrex 10*), température du sol (Thermomètre infrarouge sans contact, *Etekcity 800*) et les conditions météorologiques.

Le spécimen capturé est anesthésié, marqué, photographié et libéré. Dans un but de conservation et de protection de l'espèce, l'anesthésie des cicindèles permet de minimiser le stress individuel et autres impacts négatifs de la manipulation lors de la prise de données (Poinapen *et al.*, 2017). L'anesthésie au CO₂, un gaz inerte, est utilisée depuis longtemps pour travailler avec des insectes immobilisés (Willis et Roth, 1949; Poinapen *et al.*, 2017). L'immobilisation totale des insectes est causée par l'interférence des molécules de CO₂ avec les jonctions neuromusculaires (Nicolas et Sillans, 1989; Badre *et al.*, 2005; Bierbower et Cooper, 2013). Les impacts de l'utilisation de conditions hypoxiques pour immobiliser les insectes sont négligeables concernant la récupération, la longévité et le taux d'accouplements (Poinapen *et al.*, 2017). Pour cette étude, j'ai conçu une chambre d'anesthésie portative en 3 composantes : un contenant de plastique transparent à couvercle vissé, une valve *Schrader* de 1¹/₄" , un détendeur de CO₂ à gâchette (*Ultraflate*, pièce #G20310, <https://www.genuineinnovations.com/>) ainsi que des cartouches de CO₂ compatibles (Voir Figure 1.1). Le détendeur permet de libérer manuellement le gaz dans le contenant et évite une surpression. J'ai précédemment testé cette méthode avec 13 individus d'autres espèces communes de cicindèles, e.g. *C. sexguttata*, *C. tranquebarica*, *C. formosa*, *C. scutellaris*, *C. rependa*, *C. duodecimguttata*, afin de s'assurer de sa faisabilité et sécurité. La chambre d'anesthésie permet aussi d'observer la présence d'une marque sur l'individu, sans l'endormir.

L'individu endormi et immobile est déposé sur un plan de travail. La méthode de marquage utilisée est innovante et permet d'attribuer à chaque individu un numéro d'identification unique lors de la première capture (Voir Figure 1.2) (Watt



Figure 1.1: Assemblage de la chambre d'anesthésie et du détendeur à CO₂ pour la méthode de capture-marquage-recapture des Cicindèles vertes des pinèdes à l'Isle-Aux-Allumettes (Qc) à l'été 2019.

et al., 1977; Arnold et Knisley, 2018). Les élytres de chaque cicindèle sont marqués au crayon permanent, résistant à la décoloration et à l'eau, de type *Sharpie* métallisé (produit certifié non toxique par *The Art and Creative Materials Institute, Inc. (ACMI)*, <https://www.acmiart.org/>). Les couleurs rubis, argent et saphir s'avèrent très efficaces pour produire une marque visible, préalablement testées sur les autres espèces de cicindèles ayant subi l'anesthésie (obs. pers.).

Chaque photo cadre l'individu (vue ventrale, puis dorsale), une règle et son numéro d'identification inscrit sur le plan de travail. En laboratoire, ces photos servent à déterminer le sexe des cicindèles et à mesurer en millimètres les 5 traits morphologiques choisis à l'aide du logiciel *ImageJ* (Rasband, 2018), i.e. longueur de la tête, du pronotum et des élytres, largeur du pronotum et d'un élytre (Voir Figure 1.3). Ces traits, bien que fréquemment utilisés en entomologie (Jaskula, 2005; Chiari *et al.*, 2014), ont été choisis pour faciliter la mesure en 2 dimensions et éviter des biais de mesures avec les photographies (obs. pers.). Je n'ai pas effectué de mesures au niveau des pattes, pour éviter un biais dû à l'effet de profondeur des

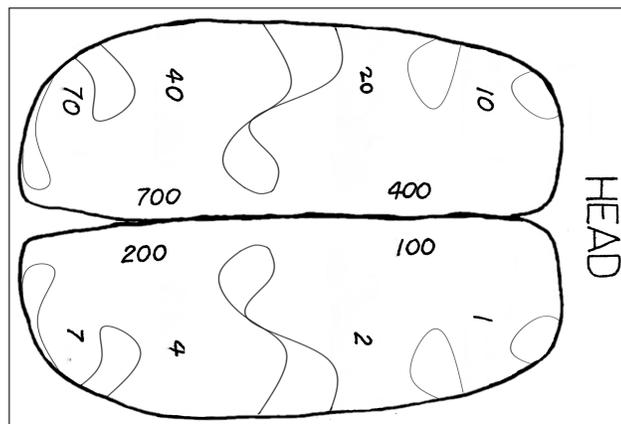


Figure 1.2: Patron de marquage à code numérique des Cicindèles vertes des pinèdes pour la méthode de capture-marquage-recapture effectuée à l’Isle-Aux-Allumettes (Qc) à l’été 2019. Les chiffres inscrits représentent l’endroit à rayer au crayon permanent pour rendre l’individu unique (e.g. individu #33 : élytres marqués à #20, #10, #2 et #1). Modifié de Arnold et Knisley (2018), via Watt *et al.* (1977).

photographies et pour ne pas avoir à manipuler ces membres délicats.

1.2.3 Caractérisation du micro-habitat

Pour chaque capture, le micro-habitat est caractérisé à l’intérieur d’un quadrat de 1 m² avec pour centre le drapeau de marquage (Hudgins *et al.*, 2011). Les pourcentages de sol nu, de végétation et de litière sont estimés à l’oeil nu par les 2 observateurs. L’épaisseur de la litière, si présente, est mesurée à l’aide d’une règle et notée selon 5 classes d’épaisseur que nous avons déterminé, soit 0 mm, moins de 5 mm, entre 5 et 10 mm, entre 10 et 20 mm, plus de 20 mm. S’il y a présence de végétation dans le quadrat, les différents types sont notés comme présence/absence, i.e. mousse, graminée, herbacée, arbuste, fougère (Hudgins *et al.*, 2011). Pour tous les types de végétation confondus, la hauteur exacte des 10 tiges les plus hautes (excluant la strate arborescente à 2 m et plus) est calculée à l’aide



Figure 1.3: Mesures linéaires (mm) prises sur les individus *C. p. patruela* capturés et photographiés à l'Isle-Aux-Allumettes (Qc) à l'été 2019. Vue dorsale : Longueur de la tête (1), du pronotum (2) et des élytres (3), Largeur du pronotum (4) et d'un élytre (5).

d'un ruban à mesurer, puis notée (Dueser et Shugart, 1978).

1.2.4 Analyses

Les résultats sont présentés avec la moyenne et la déviation standard (\pm sd). L'estimation de la taille de la population a été faite avec le programme CAPTURE (White *et al.*, 1978) et le programme *CloseTest* (Stanley et Richards, 2005). Tous deux traitent les données de CMR sans perte ni addition d'individus au cours de l'inventaire (aucune mortalité, naissance, immigration ou émigration).

Pour tester le dimorphisme sexuel de taille, nous avons fait une analyse multivariée de la variance (MANOVA) des 5 variables morphologiques selon le sexe. Pour un trait dont le résultat MANOVA est significatif, une analyse de variance (Anova) a été faite pour vérifier la différence entre les sexes. Les corrélations de tous les traits morphologiques selon le sexe ont été évaluées à l'aide de la corrélation de Pearson.

Pour déterminer la tendance des données morphologiques, nous avons fait une analyse en composantes principales (ACP) en utilisant la commande *prcomp* (R Core Team, 2021). Elle a été réalisée avec une seule composante (PC1), comme suggérée par le test basé sur la randomisation *rndLambdaF*. Une analyse de variance unidirectionnelle du modèle (*av*) teste si la mesure des traits morphologiques diffère selon le sexe.

Nous avons retiré 2 événements de capture du traitement des données, car ces individus ont été recapturés la même journée, voire à une heure d'intervalle. Les coordonnées GPS de chaque capture ($n = 68$) nous permettent de dresser un portrait général du déplacement individuel afin de déterminer si les mâles se déplacent davantage que les femelles. Un modèle linéaire généralisé (*glm*) de distribution *Poisson* met en relation le nombre de recaptures selon le sexe afin de vérifier la présence d'un biais. Deux modèles linéaires à effets mixtes (*lmer*) de la librairie *lme4* analysent l'impact du sexe (variable explicative) sur i) le nombre de jours entre 2 captures et sur ii) la distance quotidienne parcourue par l'individu (effet fixe) (R Core Team, 2021). Cette distance quotidienne moyenne parcourue a été estimée à l'aide de l'équation 1. Deux corrélations entre la taille d'un individu et son déplacement dans l'habitat ont été vérifiées, selon le sexe. Une première utilise les scores de l'ACP (PC1*-1) comme nouvelle variable morphologique pour les 31 individus. La seconde utilise la longueur totale des individus, soit l'addition de

la longueur de la tête, du pronotum et de l'élytre. L'utilisation de graphiques en violon permet de visualiser la densité de la distribution d'une variable.

$$Distance\ quotidienne = \frac{distance\ entre\ 2\ captures}{nombre\ de\ jours\ entre\ 2\ captures} \quad (1)$$

Pour cette étude, nous supposons que la parcelle où l'individu a été capturé est l'endroit où il exploitait le sol (si poursuivi : là où il fut aperçu en premier). Pour caractériser les micro-habitats utilisés par les individus *C. p. patruela* capturés, des modèles linéaires généralisés à effets mixtes (GLMM) ont été utilisés avec la fonction *glmer*. Pour chaque variable environnementale binomiale ($n = 5$, soit présence/absence de mousse, graminée, herbacée, arbuste et fougère), deux modèles GLMM ont été faits ayant comme variable explicative le sexe et comme effet fixe l'individu. Des graphiques en violon sont utilisés de nouveau afin de bien visualiser la densité de la distribution de la variable entre absence (0) et présence (1).

Pour tester si les *C. p. patruela* utilisent un micro-habitat différent selon leur sexe, j'ai utilisé des tests non paramétriques étant donné la distribution non gaussienne des données et leur résistance aux transformations. J'ai choisi les variables d'habitat suivantes, mesurées à l'intérieur des parcelles de 1 m^2 : température du sol ($^{\circ}\text{C}$), recouvrement de sol nu (%), épaisseur de la litière (mm), hauteur de la végétation (mm) et la présence/absence des 5 types de végétaux. Un positionnement multidimensionnel non métrique (NMDS) a été fait avec *metaMDS()* dans le but de faire ressortir les similitudes entre les 62 parcelles (R Core Team, 2021). Les événements de captures qui incluaient des données manquantes ont été retirés ($n = 68 - 6$). Toutes les données ont subi une transformation Hellinger pour minimiser l'effet des données extrêmes. J'ai imposé au test de conserver la distance euclidienne entre les objets pour conserver la distance géométrique dans cet espace multidimensionnel. Sur cette ordination ont été ajoutées les variables

environnementales significatives décrites par la fonction *envfit*.

Un cadrage NMDS ne permet pas de tester une hypothèse (Legendre et Legendre, 1998). Donc, j'ai testé la différence entre les 2 sexes pour l'utilisation de l'habitat avec un test d'analyse des similitudes (*Anosim*). Ensuite, j'ai testé si chaque individu choisie le même type de micro-habitat au fil des recaptures. Puisque les 62 parcelles analysées concernent parfois les mêmes individus, j'ai fait une deuxième analyse de similitudes (*Anosim*). Cette fois-ci, j'ai utilisé tout les identifiants ($n = 25$) comme des groupes, en n'incluant pas la variable sexe (17 femelles, 8 mâles). Une troisième *Anosim* teste la différence dans le choix du micro-habitat pour tous les individus, mais cette fois-ci en considérant le sexe des coléoptères.

1.3 RÉSULTATS

À l'Isle-Aux-Allumettes, 31 adultes *C. p. patruela* (19 femelles, 12 mâles) ont été marqués au cours de 23 jours d'inventaire. Le sexe-ratio ne diffère pas selon un test de proportions (prop.test : $\chi^2 = 1.161$, $df = 1$, $p = 0.281$) (R Core Team, 2021). Aucune capture n'a eu lieu le long les transects forestiers. Parmi les 31 individus capturés, 9 femelles et 5 mâles ont été recapturés au moins 1 fois (Voir Figure 1.5). Au total, il y a eu 68 événements de capture pour 0.2196 km² investigué (0.00014 individu au m², 102.04 km linéaires parcourus). Lorsque l'on retire les 12 transects sans capture, c'est 0.196 km² qui a été inventorié sur les sentiers aménagés (90 km linéaire), résultant une densité de 0.00016 individu au m² soit environ un individu tout les 1,32 km marché.

Les individus ont été capturés entre 9h30 et 15h20 (12h46 ± 2h37). La température du sol au moment des captures est en moyenne de 39.132 ± 9.377 °C ($n = 69$). La corrélation de Kendall entre l'heure de la capture et la température du sol,

de distributions non gaussienne, est $\tau = 0.347$ ($z = 4.192$, $p = < 0.001$). Le programme CAPTURE estime la population de Cicindèles vertes des pinèdes de l'IAA a environ 91 ± 26.67 individus (IC 95% : 58-169), tandis que le programme *CloseTest* l'estime à 35 individus.

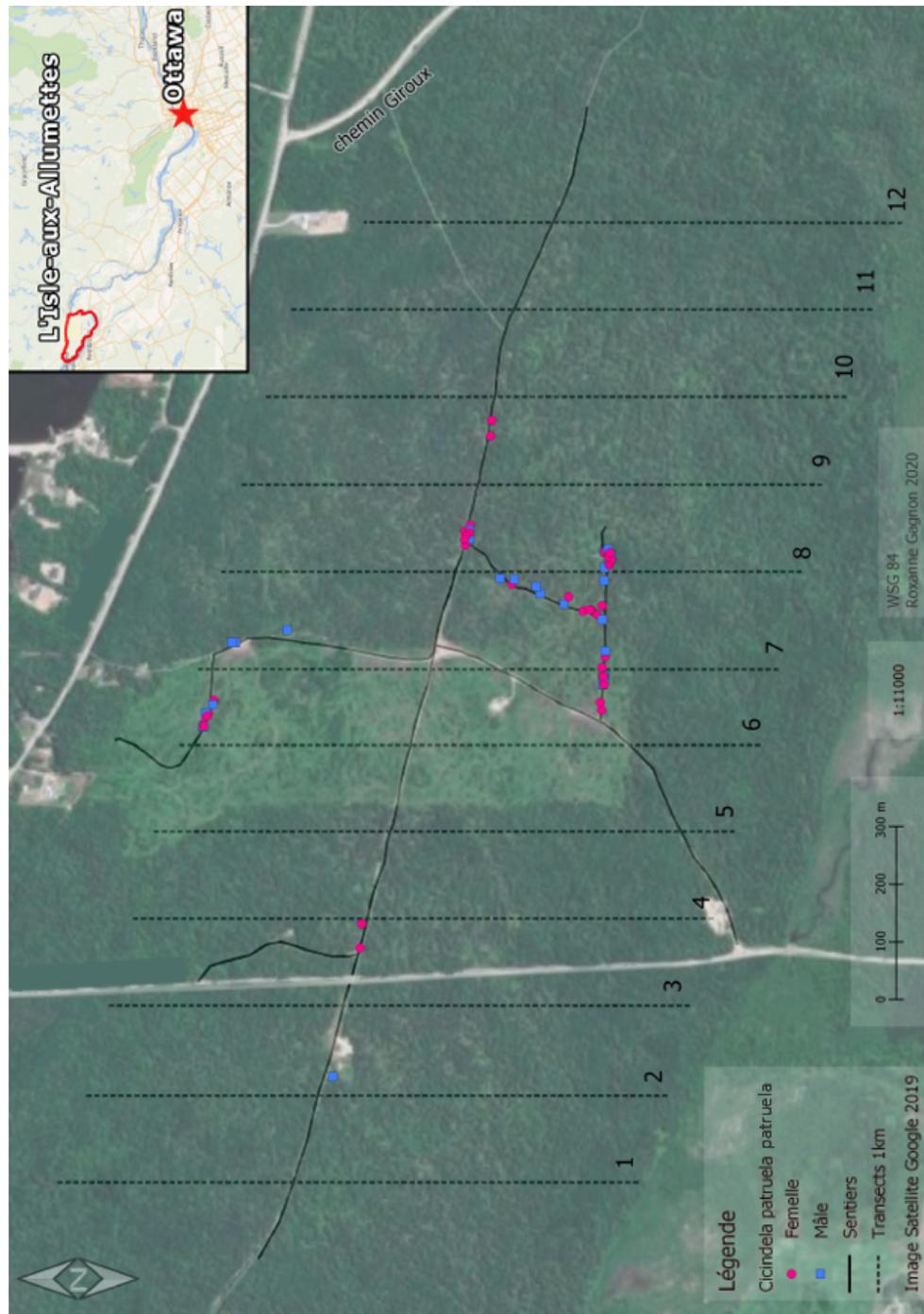


Figure 1.4: Distribution géographique des individus *C. p. patruela* (19 femelles, 12 mâle) recapturés ($n = 68$) au cours de l'été 2019 à l'Isle-Aux-Allumettes, Qc.

1.3.1 Système d'accouplement

Les femelles mesurent en moyenne 13.809 ± 0.956 mm, et les mâles 12.979 ± 0.553 mm. Le résultat de MANOVA démontre que la morphologie des individus *C. p. patruela* diffère significativement selon le sexe ($Pillai = 0.567$, $F = 6.550$, $p = < 0.001$). Le test indique que les femelles sont plus larges et longues que les mâles dans l'ensemble des variables morphologiques, sauf pour la longueur du pronotum qui est non significatif (Voir Figure 1.6, Tableau 1). Quatre analyses Anova démontrent que les 4 autres traits diffèrent selon le sexe (Voir Tableau 2).

La longueur de l'élytre est significativement corrélée avec la longueur et la largeur du pronotum chez les deux sexes (Voir Tableau 3). La largeur de l'élytre et la longueur du pronotum corrént significativement chez les femelles (0.517 , $p = 0.024$). La longueur de la tête est un faible indicateur de la taille d'un individu selon nos résultats. Elle n'a aucune corrélation significative avec d'autres traits. Elle n'a pas été utilisée pour l'analyse en composantes principales (ACP). L'ACP explique 68.4% de la variance des traits morphologiques. L'analyse de variance unidirectionnelle du modèle décrit que les femelles sont plus longues et larges que les mâles (AOV : $F = 6.332$, $ddl = 29$, $p = 0.0176$).

Nous n'avons pas détecté de différence significative dans la fréquence de recapture des individus selon le sexe ($\text{♀} = 2.105 \pm 1.449$, $\text{♂} = 2.333 \pm 1.923$, GLM : $z = 0.417$, $df = 29$, $p = 0.676$, Voir Figure 1.5, Tableau 4). Il n'y a pas de différence significative dans le nombre de jours entre 2 captures ($\text{♀} = 5.581 \pm 3.546$, $\text{♂} = 4.930 \pm 3.431$, LMER : $t = -0.561$, $df = 35$, $p = 0.578$, Voir Tableau 5).

La distance entre 2 captures varie entre 1.356 m et 182.093 m chez les femelles, et entre 1.909 m à 332.432 m chez les mâles. Il n'y a pas de différence dans la distance

quotidienne parcourue selon le sexe ($\varphi = 9.121 \pm 8.628 m$ [1.80 m; 27.0 m], $\sigma = 12.457 \pm 12.690 m$ [1.58 m; 33.0 m], LMER : $t = 0.533$, $df = 7.862$, $p = 0.609$, Voir Figure 1.7, Voir Tableau 6).

Aucune corrélation n'est significative entre la morphologie de l'individu et la distance quotidienne qu'il parcourt (Voir Tableau 7).

1.3.2 Micro-habitats

D'après nos GLMM, nous avons capturé plus d'individus là où il y avait présence de graminées ($z = 2.934$, $df = 60$, $p = 0.003$) et là où il y avait moins de fougères ($z = -2.352$, $df = 60$, $p = 0.019$). Visualiser le résumé complet de la distribution des variables mesurées dans l'habitat selon le sexe à l'aide des graphiques en violon à la Figure 1.8.

Le cadrage NMDS démontre, sans puissance statistique, qu'il n'y a pas de différence entre les micro-habitats où les *C. p. patruela* mâles et femelles ont été capturés (Stress = 0.0268, Voir Figure 1.9). L'ordination révèle qu'il n'y a aucune relation dans la variable « sexe » selon la qualité de l'ajustement (*gof* : $r^2 = 0.004$, $p = 0.66$). Il n'y a pas de différence significative entre les 2 sexes pour le choix du micro-habitat parmi les 62 parcelles (Statistique $R = -0.040$, $p = 0.911$).

Il y a une différence significative entre les individus ($n = 25$) pour l'utilisation du micro-habitat (Statistique $R = 0.294$, $p < 0.001$). Entre les individus mâles uniquement ($n = 8$), il y a aucune différence significative (Statistique $R = 0.175$, $p = 0.0695$). Cependant, cette différence est significative entre les individus femelles ($n = 17$, Statistique $R = 0.388$, $p < 0.001$).

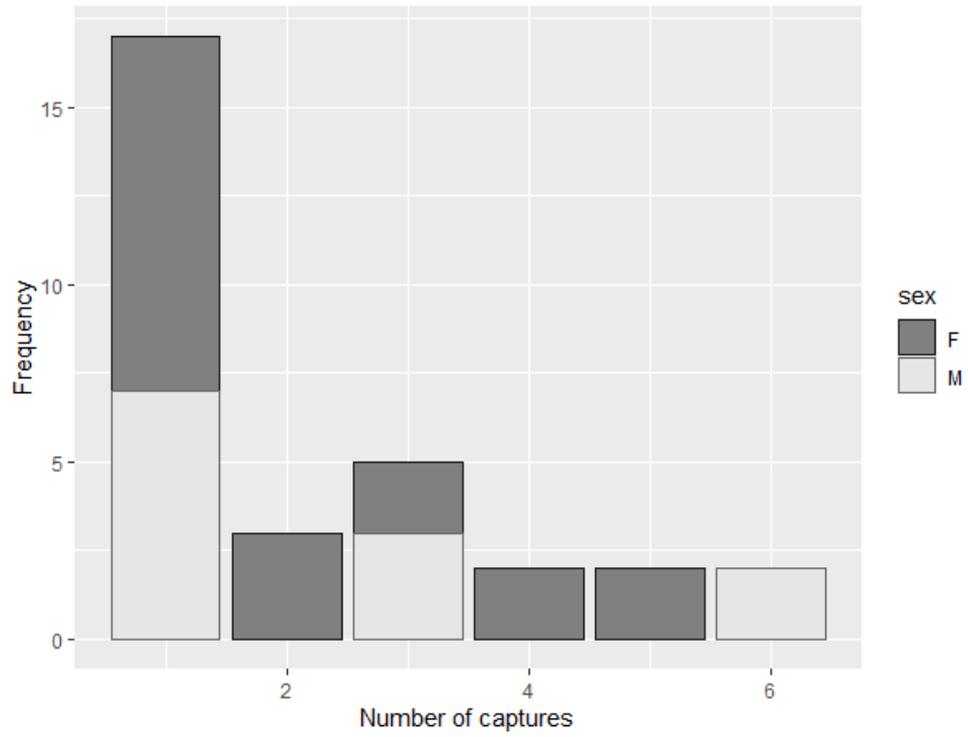


Figure 1.5: Recaptures summary of the 31 individuals *C. p. patruela* at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019. Total of 68 captures, 19 females (F) and 12 males (M).

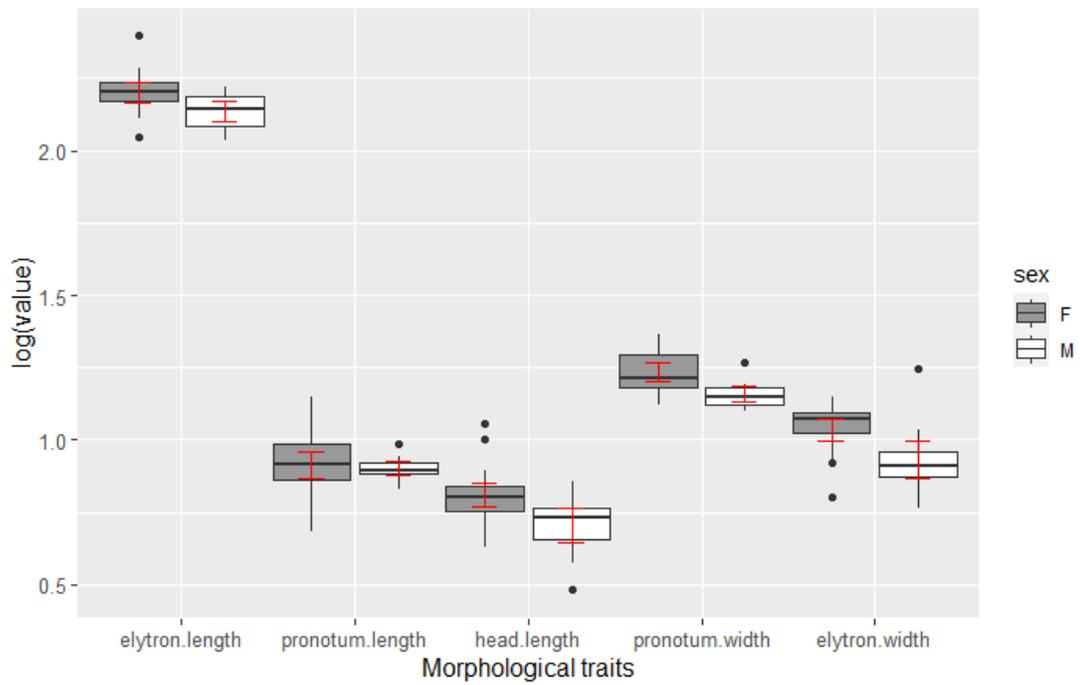


Figure 1.6: Sexual size dimorphism observed in *C. p. patruela* ($n=31$) at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019. Errorbars with 95% confidence interval in red. The value is in millimeters, females (F) and males (M). The length of the pronotum is the only non significant trait according to a MANOVA test.

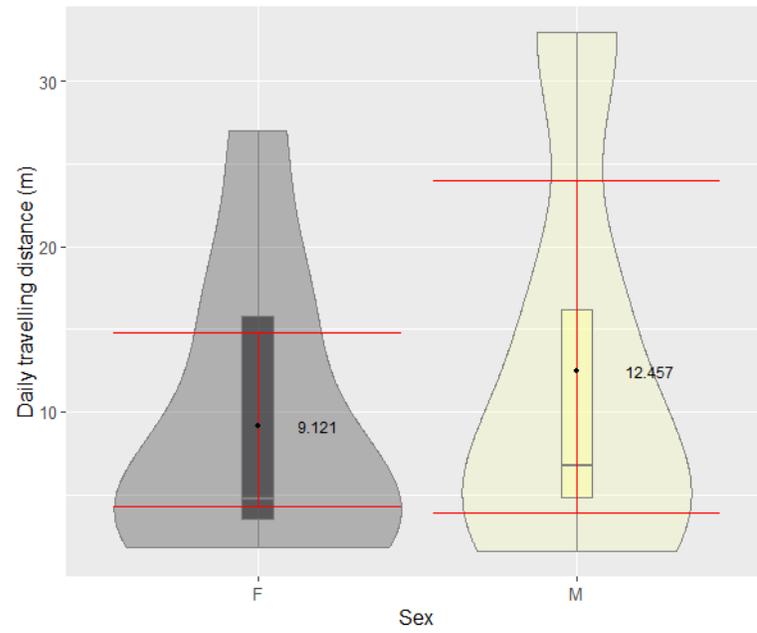


Figure 1.7: Daily distance traveled by *C. p. patruela* females (F, $n = 9$, events = 21) and males (M, $n = 5$, events = 16) at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019. Mean is written for each sex, errorbars with 95% confidence interval in red.

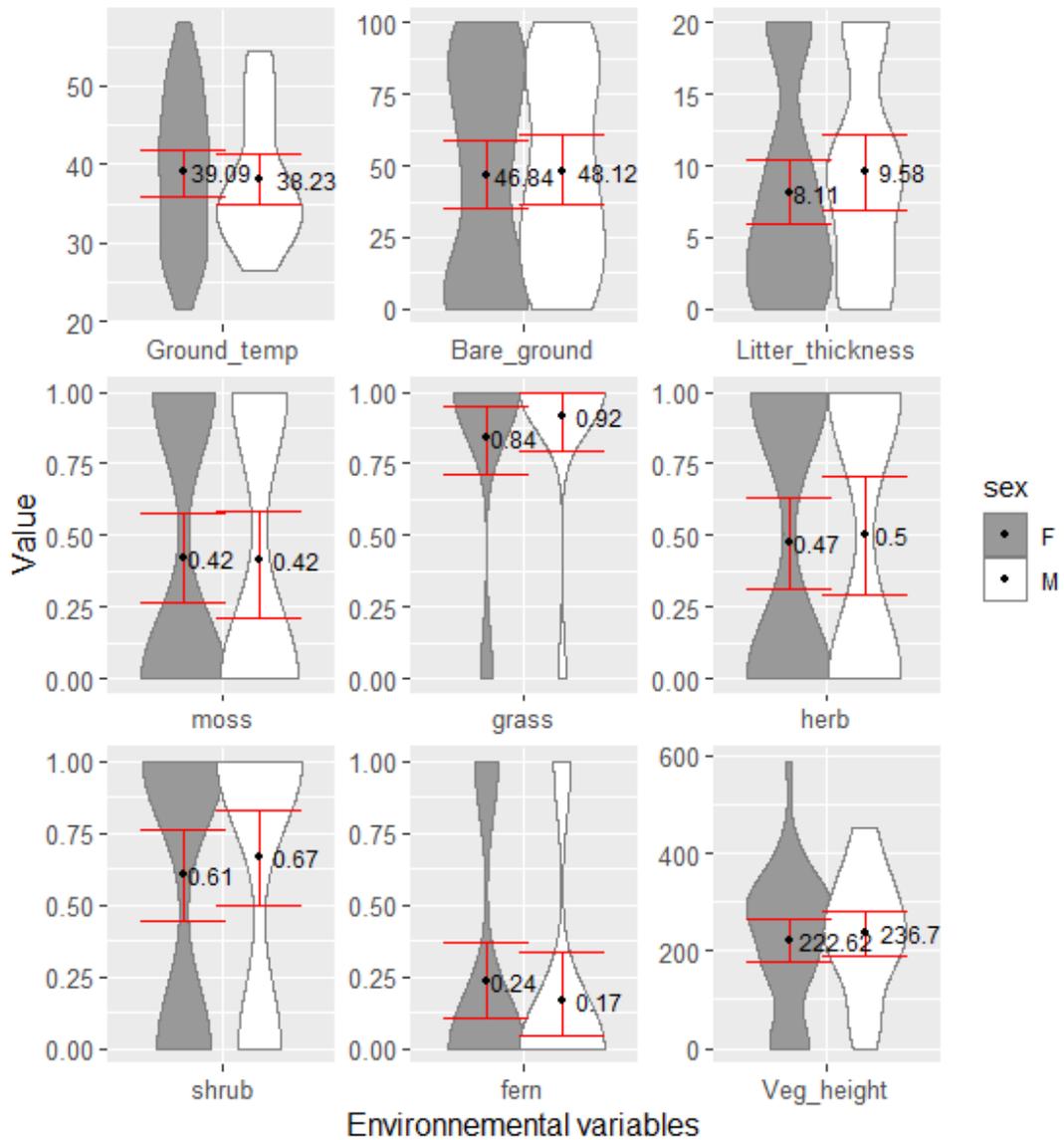


Figure 1.8: Environmental variables summary for each 1 m² plot where a *C. p. patruela* was captured ($n = 62$) at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019. Mean is written for each sex, females (F) and males (M). Errorbars with 95% confidence interval in red. Value : Ground temperature (°C), bare ground (%), Litter thickness (mm), moss, grass, herb, shrub and fern are binomial variables, vegetation height (mm). There is no sex difference in the microhabitat choice according to an analysis of similarities.

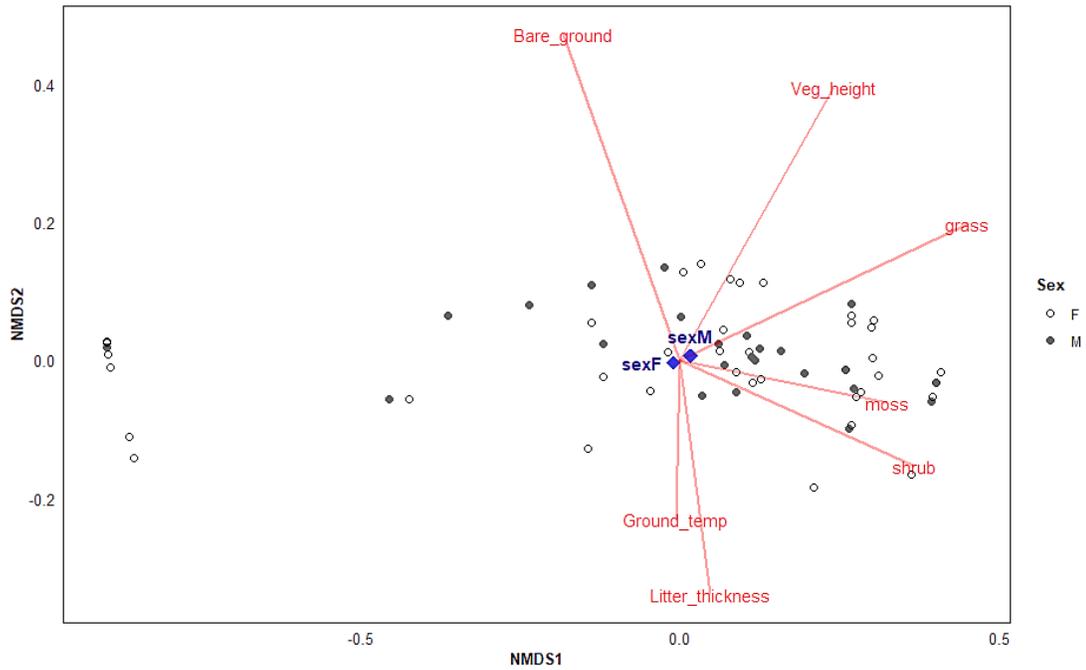


Figure 1.9: Non-metric multidimensional scaling (NMDS) plot ordination performed for each capture of *C. p. patruela* ($n = 62$) at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019. Females (F) and males (M). $Stress = 0.0268$. Based on Hellinger transformation of environmental data ($y = 9$) and the Euclidean distance. Each point represents a single 1 m^2 plot. Non significant variables ($envfit\ p < 0.05$) has been removed : herb, fern.

Table 1.1 : Multivariate analysis of variance (MANOVA) on five morphological traits measured on *C. p. patruela* individuals ($n = 31$) captured at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019.

Morphological Traits	Df	Sum Square	Mean Square	F Value	Pr(>F)
Head Length	1	0.077	0.077	6.975	0.013
Residuals	29	0.318	0.011		
Pronotum Length	1	0.001	0.001	0.186	0.669
Residuals	29	0.007	0.008		
Elytron Length	1	0.030	0.030	5.290	0.029
Residuals	29	0.163	0.006		
Pronotum Width	1	0.044	0.044	9.971	0.004
Residuals	29	0.128	0.004		
Elytron Width	1	0.091	0.091	8.484	0.007
Residuals	29	0.313	0.011		

Female as reference sex. Statistically significant traits p-value are in bold ($p < 0.05$).

Table 1.2 : Mean (\pm standard error) and coefficient of variation (CV) for four morphological traits measured on *C. p. patruela* females ($n = 19$) and males ($n = 12$) captured at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019.

Traits	Females		Males		F-value	Pr(>F)
	Mean \pm se	CV	Mean \pm se	CV		
Head Length	2.261 \pm 0.055	10.605	2.042 \pm 0.062	10.504	6.628	0.015
Elytron Length	9.037 \pm 0.169	8.165	8.470 \pm 0.155	6.352	5.283	0.029
Pronotum Width	3.444 \pm 0.060	7.652	3.183 \pm 0.044	4.831	9.643	0.004
Elytron Width	2.840 \pm 0.054	8.265	2.551 \pm 0.101	13.682	7.622	0.010

Single-factor ANOVAs test the effect of the sex. All F-values ($df = 1$) are statistically significant ($p < 0.05$). Non significant variable has been removed : pronotum length.

Table 1.3 : Pearson's coefficients of correlations between five morphological traits measured on *C. p. patruela* individuals ($n = 31$), sex apart, captured at Isle-Aux-Allumettes(Qc), summer 2019.

	Head Length	Pronotum Length	Elytron Length	Pronotum Width	Elytron Width
	Females				
Head Length		-0.072	-0.454	0.255	-0.009
Pronotum Length	-0.111		0.624	0.769	0.517
Elytron Length	-0.198	0.848		0.739	0.406
Pronotum Width	0.141	0.719	0.670		0.390
Elytron Width	0.041	0.161	-0.080	0.012	
	Males				

Females ($n = 19$) correlations are above the diagonal, males are below ($n = 12$). Statistically significant correlations are in bold ($p < 0.05$).

Table 1.4 : General linear model (GLM) showing no sex difference in number of recaptures for *C. p. patruela* individuals ($n = 31$) at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019.

Coefficients	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
Id (intercept)	0.744	0.158	4.708	< 0.001
Sex Male	0.103	0.246	0.417	0.676

Null deviance : 31.817 on 30 df, Residual deviance : 31.644 on 29 df

Female as reference sex. Family *poisson*, AIC = 113.25. 19 females and 12 males.

Table 1.5 : Linear mixed-effects model (LMER) showing no sex difference in elapsed time between recaptures for *C. p. patruela* individuals ($n = 14$) at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019.

Random effects				
Groups name	Variance	Std. Dev.		
Id (intercept)	0.0	0.0		
Residual	12.23	3.497		
Number of obs : 37, groups : id, 14				
Fixed effects				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	5.581	0.763	7.313	< 0.001
Sex Male	-0.651	1.161	-0.561	0.578
Correlation of Fixed Effect for Sex Male : -0.658				
Female as reference sex. REML criterion at convergence = 192.8. Total of 37 displacements : 21 events for 9 females and 16 events for 5 males.				

Table 1.6 : Linear mixed-effects model (LMER) showing no sex difference in the daily distance traveled by *C. p. patruela* individuals ($n = 14$) at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019.

Random effects				
Groups name	Variance	Std. Dev.		
Id (intercept)	7.607	2.758		
Residual	213.569	14.614		
Number of obs : 37, groups : id, 14				
Fixed effects				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	9.059	3.348	2.706	0.021
Sex Male	2.735	5.135	0.533	0.609
Correlation of Fixed Effect for Sex Male : -0.652				
Female as reference sex. REML criterion at convergence = 293.9. Total of 37 displacements : 21 events for 9 females and 16 events for 5 males.				

Table 1.7 : Pearson's coefficients of correlation between the size of *C. p. patruela* individuals ($n = 14$) and their daily travelled distance at Isle-Aux-Allumettes (Qc), summer 2019.

	Individual average distance traveled daily / Morphological PC1*-1 scores		Individual average distance traveled daily / Total length	
	Coefficients	p-value	Coefficients	p-value
Females	-0.530	0.142	0.557	0.119
Males	-0.845	0.071	0.623	0.258

No correlation is statistically significant at ($p < 0.05$). Total of 37 displacements : 21 events for 9 females and 16 events for 5 males. PC1*-1 makes negative values positive and show more intuitively that females are larger. Total length is the addition of head, pronotum and elytron length.

1.4 DISCUSSION

Ma première hypothèse supposait que la *C. p. patruela* pratique un système d'accouplement de compétition par brouillage. J'ai prédit un dimorphisme sexuel de taille favorable pour les femelles, en plus d'un déplacement dans l'habitat plus grand chez les mâles. Ma deuxième hypothèse supposait que le micro-habitat utilisé diffère selon le sexe des individus *C. p. patruela*. J'ai prédit que les micro-habitats des individus femelles se ressemblaient entre eux, puisque toutes restent à proximité des sites de pontes favorables, tandis que ceux des individus mâles seraient très aléatoires, dus à leurs déplacements dans l'habitat.

Des études de toutes sortes ont été menées sur des insectes du genre *Cicindela* (Jaskula, 2005; Hudgins *et al.*, 2011; Brust *et al.*, 2012). Plusieurs portent sur des espèces en péril (Chiari *et al.*, 2014; Johnson *et al.*, 2010; Cornelisse *et al.*, 2013; Arnold et Knisley, 2018), mais très peu concernent de la Cicindèle verte des pinèdes (Knisley *et al.*, 1990; Mawdsley, 2005; Schlesinger et Novak, 2011; Saint-Germain, 2017). La présente étude avait pour objectif de combler un manque de connaissances chez l'espèce, afin de guider les futurs efforts de conservation.

Le test de chi-carré indique que les 2 sexes ont la même proportion dans la population. Cela indique un bon équilibre entre les sexes et c'est aussi un résultat essentiel pour évaluer l'état biologique d'une population (Pearson et Vogler, 2001; Cornelisse *et al.*, 2013). La densité d'individus capturée à l'IAA en 2019 est très faible si on la compare à l'étude de juin 2017 menée pour Environnement et Changement Climatique Canada, ayant obtenu une moyenne de 15,96 individus détectés par kilomètre de sentiers (Saint-Germain, 2017). À noter, la densité des individus calculée dans l'étude de Saint-Germain (2017) ne concerne que les zones d'habitats favorables. Bien que mis de côté dans mon étude, les 12 km des transects inventoriés traversaient des peuplements non adéquats à l'espèce, soit des sapinières et

des forêts denses en feuillus.

L'heure moyenne des captures démontre une activité plus intense des cicindèles en milieu de journée, lorsqu'il fait plus chaud. Selon une étude réalisée en Indiana, aux États-Unis, les *C. p. patruela* ne sont pas actives très tôt en matinée étant donné la température fraîche de l'air ambiant (Knisley *et al.*, 1990). Une autre étude qui porte sur l'habitat et la dispersion de *C. marginipennis* affirme apercevoir rarement les cicindèles avant 10h et après 17h lors journée chaude et ensoleillée (Hudgins *et al.*, 2011).

L'estimation des paramètres démographiques, telle la taille de la population, est essentielle pour caractériser une population et poser des actions de conservation (Schwarz et Arnason, 1996; Chiari *et al.*, 2014; Arnold et Knisley, 2018). Il faut considérer que nos résultats sont basés sur un faible nombre de recaptures. Le programme *CloseTest* souligne qu'au cours de la période de capture, il y aurait eu du recrutement d'individus. D'après nos observations sur le terrain, nous suggérons que cette «addition» résulte de l'émergence tardive des individus au cours de la période estivale (Knisley *et al.*, 1990; Pearson *et al.*, 2006). Ainsi, il est fort probable que la population de *C. p. patruela* de l'IAA soit de moins de 100 individus comme l'indique le programme CAPTURE. Cela rappelle que l'espèce est uniquement retrouvée en petites populations isolées (Pearson *et al.*, 2006; NatureServe Explorer, 2009; ECCC, 2016).

1.4.1 Système d'accouplement

Le dimorphisme sexuel chez les espèces de cicindèles se perçoit habituellement au niveau de la taille des individus, où les femelles sont plus longues et larges que les mâles (Pearson et Vogler, 2001). J'observe dans la population de *C. p. patruela*

de l'IAA que les femelles ont des élytres plus longs et larges, une tête plus longue et un pronotum plus large que les mâles. La longueur du pronotum reste un trait semblable entre les 2 sexes. Les corrélations entre les 5 traits nous permettent de comprendre la relation entre les structures morphologiques. La longueur de la tête ne corrèle avec aucun autre trait, tout comme dans l'étude de Jaskula (2005) qui analyse le dimorphisme sexuel chez *C. hybrida hybrida*. En comparaison, l'étude démontre aussi une corrélation significative entre la longueur de l'élytre et la largeur du pronotum (femelles : 0.646, mâles : 0.579) (Jaskula, 2005). Les femelles *C. h. hybrida* sont elles aussi plus longues et larges que les mâles (Jaskula, 2005), tout comme nos analyses nous l'indiquent pour *C. p. patruela*.

Nous savons désormais qu'un dimorphisme sexuel de taille est présent dans la population de *C. p. patruela* de l'Isle-Aux-Allumette. La taille d'un individu est sélectionnée naturellement pour avantager son aptitude phénotypique, soit sa survie et sa reproduction (Thornhill et Alcock, 1983; Herberstein *et al.*, 2017). En théorie, les cicindèles mâles délaissent l'armement et une grande taille au profit d'une meilleure mobilité, perception de l'environnement et mémoire spatiale (Schwagmeyer, 1988; Jayaweera et Barry, 2017). Ces traits sexuels sont largement plus importants, puisqu'ils sont en situation de compétition précopulatoire non agressive. Son succès reproducteur est basé sur le nombre de femelles qu'il copule dans l'habitat (Schwagmeyer, 1988). Quant à elles, les femelles choisissent de s'accoupler ou non avec les mâles qui les visitent (Thornhill et Alcock, 1983; Pearson et Vogler, 2001). Une femelle cicindèle de grande taille a un avantage considérable à accorder plus d'énergie à la production d'oeufs plus gros (Pearson et Vogler, 2001). Sa taille est corrélée positivement avec sa fertilité et son énergie au moment de l'oviposition (Pearson et Vogler, 2001).

Pour planifier des actions de conservation pour la Cicindèle verte des pinèdes, je devais aussi considérer le déplacement des individus dans l'habitat. Il n'y a pas de

biais dans le recapture des individus selon leur sexe, mais les mâles semblent l'être légèrement plus que les femelles. Il n'y a pas non plus de biais dans le nombre de jours entre deux captures selon leur sexe. Encore une fois, les mâles tendent à être recapturés plus rapidement que les femelles, ce qui contribue à croire qu'ils sont plus actifs qu'elles. Cette analyse a aussi été effectuée auprès de *C. marginipennis* : $\varphi = 10.2 \pm 2.6 (se)$, $\sigma = 7.4 \pm 2.6 (se)$ (Hudgins *et al.*, 2011). La différence entre les sexes est non significative et peut observer que les individus *C. patruela* sont capturés plus fréquemment au cours de mon étude, soit 5 jours.

Les jours entre 2 captures peuvent présenter des conditions météorologiques non favorables pour les cicindèles en général. Cela peut retarder les recaptures de même qu'avoir un impact sur les déplacements, les activités et la survie de ces insectes.

J'ai démontré que chez *C. p. patruela*, la distance moyenne parcourue par un individu entre 2 captures est semblable chez les 2 sexes et donc, qu'aucun ne se déplace plus qu'un autre dans l'habitat. Une étude qui porte sur *C. ohlone* a aussi étudié ces déplacements, mais les valeurs maximales sont moins élevées : $\varphi : [8 - 148 m]$, $\sigma : [9 - 180 m]$ (Arnold et Knisley, 2018). De plus, mes corrélations entre la taille d'un individu et son déplacement quotidien dans l'habitat démontrent qu'un grand mâle ne se déplace pas davantage qu'une petite femelle.

Il faut rappeler que les déplacements de l'espèce *C. p. patruela* sont en général très limités dans l'habitat (COSEPAC, 2009; Farrell *et al.*, 2011; Pearson *et al.*, 2015; ECCC, 2016). Les résultats de mon étude ne permettent pas de déterminer si la population de l'IAA est ouverte, i.e. métapopulation. La plus grande distance de dispersion calculée fut de 332 m pour un mâle, qui par ailleurs fut capturé 6 fois malgré ses déplacements. De futures investigations sont nécessaires afin d'explorer de potentielles populations de Cicindèles vertes des pinèdes à proximité. Aussi, puisque l'inventaire s'est déroulé pendant la saison de reproduction, il est fort

probable que les individus ne cherchaient pas à se disperser vers d'autres lieux que l'habitat d'émergence. Il serait intéressant d'investiguer si une période de grande dispersion se produit chez *C. p. patruela* et à quel moment elle a lieu dans la saison.

Nous savons, via le système d'accouplement, que les mâles se déplacent dans l'habitat à la conquête des femelles (Pearson et Vogler, 2001). Une raison qui pourrait expliquer le déplacement des femelles dans l'habitat serait qu'elles comblent elles aussi leurs besoins de bases, i.e. repos, thermorégulation, chasse et fuite. Elles doivent aussi se déplacer à la recherche d'un site de ponte adéquat (Brust *et al.*, 2012), car ceux à proximité sont déjà occupés.

Je soulève l'hypothèse qu'il pourrait exister de la compétition territoriale entre les femelles dans l'obtention du meilleur site de ponte disponible. Cela forcerait les perdantes à se disperser un peu plus loin dans l'habitat pour pondre. Le déplacement des femelles peut alors s'expliquer selon la théorie de la distribution libre idéale, où la distribution des individus est proportionnelle à la densité des ressources disponibles (Fretwell, 1972). C'est ainsi plus rentable d'exploiter un site de ponte légèrement moins adapté et plus éloigné, qu'un site plus près où la compétition est très élevée.

1.4.2 Micro-habitats

Il n'existe aucune étude chez la Cicindèle verte des pinèdes qui compare l'habitat entre les femelles et les mâles. Mes résultats démontrent que la présence de graminées et l'absence de fougères tendent à expliquer l'utilisation d'un micro-habitat par un individu. J'ignore si l'individu capturé utilise réellement le micro-habitat analysé ou s'il ne fait qu'y passer. Les autres variables environnementales nous

donnent un aperçu global des parcelles où ont eu lieu les captures, démontrant l'hétérogénéité du site d'étude.

L'ordination NMDS démontre clairement, en plus de l'analyse des similitudes (*Anosim*), que le micro-habitat des femelles ne diffère pas de celui des mâles selon nos données de captures. Selon mes observations, la majorité des individus *C. p. patruela* utilise des parcelles où le sol est à moitié nu (i.e. sable) et à moitié recouvert de litière peu épaisse et/ou d'une végétation plutôt riche en graminées. La présence de graminées peut leur être utile afin de se camoufler, de chasser ou simplement de se reposer (Pearson *et al.*, 2015). De plus, j'émet l'hypothèse que la présence de fougères est évitée par les *C. p. patruela* lorsqu'elles tentent de se réchauffer.

Une étude de l'Ohio rapporte que la température corporelle des *C. sexguttata*, une espèce commune à l'IAA, varie entre 32°C et 37°C lorsque les individus sont actifs (Schultz, 1998), soit très près de la température létale de 39°C des cicindèles (Pearson *et al.*, 2015). La température du sol moyenne recensée pour 40 quadrats de 1 m² dans l'État de New York est de 32.3°C [21.5; 46.4] (Hudgins *et al.*, 2011). Cette même étude rapporte avoir observé des *C. marginipennis* posées sur des substrats humides lors des journées très chaudes. En ce qui nous concerne, les *C. p. patruela* tente d'augmenter leur température interne avec le soleil lorsque celle-ci descend sous 34 °C (Knisley *et al.*, 1990). Selon cette même étude, elles tentent d'évacuer la chaleur lorsque leur température excède les 35 °C. À l'IAA, les *C. p. patruela* ont été capturées sur un sol avoisinant la température létale, i.e. 39°C. Il existe plusieurs techniques de thermorégulation que les individus pratiquent afin de se refroidir (Knisley *et al.*, 1990; Schultz, 1998; Pearson *et al.*, 2006; Pearson *et al.*, 2015). L'étude de Schultz (1998) mentionne que les cicindèles sont incapables de maintenir leur température corporelle optimale à l'ombre, d'où la nécessité des ouvertures dans la canopée. Les cicindèles sont des espèces ecto-

thermes et elles dépendent directement de l'habitat pour atteindre et maintenir leur température corporelle optimale (Schultz, 1998; Pearson *et al.*, 2006).

Les données recueillies ne permettent pas d'associer le micro-habitat avec le comportement de la cicindèle l'instant avant la capture. Une cicindèle utilise différents micro-habitats selon l'activité qu'elle pratique et sa température corporelle (Knisley *et al.*, 1990; Schultz, 1998; Pearson *et al.*, 2006). Il aurait été pertinent de noter le comportement des *C. p. patruela* avant la capture, pour ainsi associer le type de micro-habitat selon le sexe et le comportement. Cette variable supplémentaire aurait permis de déterminer si la cicindèle était en déplacement ou si elle utilisait réellement la parcelle. Pour les femelles, cette information aurait été particulièrement utile afin de localiser de potentiels sites de ponte, de part un comportement de creusage.

Mes analyses des similitudes (*Anosim*) démontrent une différence dans le choix du micro-habitat chez les *C. p. patruela* de l'IAA, et significativement chez les femelles. Mes résultats démontrent qu'elles sélectionnent leur parcelle indépendamment des autres femelles. Parmi les 17 femelles capturées, certaines utilisent un type de micro-habitat totalement différent de celui utilisé par la majorité des individus de l'espèce. Selon le système d'accouplement, une femelle est souvent retrouvée près d'un endroit qu'elle a désigné adéquat à l'oviposition, cela dit près du lieu d'accouplement (Pearson *et al.*, 2006). Certaines peuvent être contraintes de se déplacer en quête d'un site de ponte moins favorable, mais là où la compétition est moindre et les ressources plus abondantes, i.e. comme expliqué précédemment par la théorie de la distribution libre idéale (Fretwell, 1972). Cela ne serait donc pas de la « préférence » envers l'utilisation d'une parcelle, mais plutôt une différence de micro-habitat due à une hiérarchie dans la population.

1.4.3 Limites de l'étude

L'étude s'est déroulée sur une longue période de temps, ce qui présume des événements de naissance et décès (Arnold et Knisley, 2018), i.e. population ouverte. Nous estimions que la saison d'activité chez les adultes *C. p. patruela* à l'Isle-Aux-Allumettes était de mi-avril à mi-juillet (Pearson *et al.*, 2015). L'émergence tardive de plusieurs individus capturés en juillet 2019 peut être due aux conditions météorologiques d'un début de printemps plus froid (Knisley *et al.*, 1990). En raison de ces conditions printanières, la première capture fut le 6 juin 2019, suivi d'un pic de captures en fin-juin, une dernière capture le 11 juillet, puis 7 captures les 7 et 8 août 2019. Une prochaine étude à l'IAA devrait étendre davantage sa période d'inventaire.

Les conditions météorologiques et le type de couvert au sol influencent la détectabilité des individus. La présence plus accrue des cicindèles en sentiers sablonneux augmente leur visibilité (Saint-Germain, 2017). La détection des individus le long des 12 transects forestiers a certainement été impactée, quoique les peuplements n'étaient pas adaptés à l'espèce, i.e. sapinière, forêt dense de feuillus, litière épaisse au sol. La répartition des Cicindèles vertes des pinèdes dans un habitat aussi hétérogène qu'une lande de pins et de chênes, en plus d'une faible abondance d'individus et des préférences en matière de micro-habitats, se résume en une détection imparfaite (Schlesinger et Novak, 2011). Ces individus rares sont difficiles à observer, encore plus à capturer (Arnold et Knisley, 2018). Tous les individus ont été capturés le long des sentiers, i.e. un habitat anthropisé. Bien que les 12 transects uniformes ont permis de contrôler le biais d'échantillonnage, je voulais maximiser mes chances de capturer des Cicindèles vertes de pinèdes pour caractériser la population de l'IAA. Cela résume pourquoi je n'ai pas mené une étude de présence/absence des cicindèles (Schlesinger et Novak, 2011).

Pour bien entreprendre les mesures de conservation pour la *C. p. patruela*, je recommande un suivi à long terme de la population de l'Isle-Aux-Allumettes, une analyse démographique et environnementale des stades larvaires, de même qu'une étude comportementale de l'utilisation de l'habitat par les adultes.

.

CONCLUSION

Cette étude marque un acquis considérable de connaissances chez la Cicindèle verte des pinèdes. À des fins de conservation, la gestion de cette espèce pourra être mieux guidée. J'ai constaté qu'il n'y avait pas de différence dans le déplacement des individus selon leur sexe. Les courts déplacements rapportés ici et dans plusieurs rapports scientifiques (COSEPAC, 2009; Pearson *et al.*, 2015; ECCC, 2016) rappellent que *C. p. patruela* est une espèce qui vit dans un habitat fragile, isolé et fragmenté. Les individus femelles utilisent des micro-habitats différents entre elles, quoique nous n'avons pas noté de différence selon le sexe. L'ensemble des *C. p. patruela* a été capturé dans des parcelles où le sol est à moitié nu (i.e. sable) et à moitié recouvert de litière peu épaisse et d'une végétation plutôt riche en graminées. Je recommande que davantage de ce type de micro-habitat, qui semble propice à *C. p. patruela*, soient aménagés aux alentours du site d'étude de l'IAA et dans les habitats potentiels à proximité.

La Cicindèle vertes des pinèdes nécessite des efforts de conservation : d'ici peu de temps, la dégradation des landes de pins et des savanes de chênes refermera les populations sur elles-mêmes, laissant ainsi une distance trop grande entre les habitats favorables pour permettre la dispersion des individus vers une potentielle métapopulation. La conservation de cet habitat rare doit être envisagée au niveau mondial, puisqu'elles abritent bien d'autres espèces en péril : Noctuidés du genre *Zale sp.*, Hespérie tachetée (*Erynnis martialis*), Lutin givré (*Callophrys irus*), Bleu mélissa (*Plebejus samuelis*), Scarabée rhinocéros (*Xyloryctes jamaicensis*) Pic à tête rouge (*Melanerpes erythrocephalus*), etc. (Willis, 2001; Pinery Provincial Park, 2019b).

Cet habitat est menacé par l'Homme : directement par l'urbanisation, qui réduit la quantité de zones forestières adaptées, et indirectement par la suppression des feux qui réduisent en taille et en nombre l'abondance des ouvertures de la canopée fréquentées par l'espèce (Schlesinger et Novak, 2011). En régions appropriées, le contrôle des feux est essentiel au maintien de ce type d'habitat et par conséquent, à la survie des populations de *C. p. patruela* (Mawdsley, 2005; COSEPAC, 2009; NatureServe Explorer, 2009; Pinery Provincial Park, 2019a). Le feu permet de réduire la végétation ligneuse et d'augmenter les zones de sol à nu ou de végétation clairsemée. L'absence de ce phénomène naturel aurait pour conséquence la transition des savanes et des boisés en des forêts matures, trop denses pour les besoins de ce coléoptère feu-dépendant (Pinery Provincial Park, 2019a). Cette gestion des incendies est pratiquée au Parc Provincial Pinery et dans les montagnes Shawangunk pour restaurer, maintenir et agrandir l'habitat de la Cicindèle verte des pinèdes (Schlesinger et Novak, 2011; Pinery Provincial Park, 2019a), le tout pour le maintien d'un habitat de milieu de succession (COSEPAC, 2009).

La conservation de la Cicindèle verte des pinèdes requiert de minimiser l'utilisation de véhicules tout-terrain et l'usage touristique des sentiers pour la marche à pied. Ces usages augmentent la mortalité des individus et perturbent le comportement des adultes (chasse, reproduction, ponte). Aussi, les habitats de l'espèce connus et potentiels ne devraient pas subir d'extraction de sable et de compactage du sol par véhicules lourds, qui risque de rendre le sol non adéquat aux sites de ponte. L'étendage du gravier sur les sentiers de randonnée est aussi à proscrire, car cela réduit considérablement les zones de sol nu nécessaires aux activités des cicindèles pour l'alimentation, la fuite et la ponte (Schultz, 1998; Saint-Germain, 2017; Arnold et Knisley, 2018).

En protégeant l'habitat rare de la Cicindèle verte des pinèdes, c'est rendre une faveur à de nombreuses autres espèces en péril.

RÉFÉRENCES

- Arnold, R. A. et Knisley, C. B. (2018). Biology and Conservation of *Cicindela ohlone* Freitag and Kavanaugh (Coleoptera : Carabidae : Cicindelinae), the Endangered Ohlone Tiger Beetle. *Coleopterists Bulletin*, 72(3), 577–590.
<http://dx.doi.org/10.1649/0010-065X-72.3.577>
- Badre, N. H., Martin, M. E. et Cooper, R. L. (2005). The physiological and behavioral effects of carbon dioxide on *Drosophila melanogaster* larvae. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 140(3), 363–376.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cbpb.2005.01.019>
- Bierbower, S. M. et Cooper, R. L. (2013). The mechanistic action of carbon dioxide on a neural circuit and NMJ communication. *Journal of Experimental Zoology Part A : Ecological Genetics and Physiology*, 316(9), 340–354.
<http://dx.doi.org/10.1002/jez.1798>
- Brust, M. L., Knisley, C. B. and Spomer, S. M. et Miwa, K. (2012). Observations of oviposition behavior among North American tiger beetle (Coleoptera : Carabidae : Cicindelinae) species and notes on mass rearing. *The Coleopterists Bulletin*, 66(4), 309–314.
<http://dx.doi.org/10.1649/072.066.0403>
- Campanaro, A., Zapponi, L., Hardersen, S., Méndez, M., Fulaij, N. A., Audisio, P., Bardiani, M., Carpaneto, G. M., Corezzola, S., Rocca, F. D., Harvey, D., Hawes, C., Kadej, M., Karg, J., Rink, M., Smolis, A., Sprecher, E., Thomaes, A., Toni, I., Vrezec, A., Zauli, A., Zilioli, M. et Chiari, S. (2016). A European monitoring protocol for the stag beetle, a saproxylic flagship species. *Insect conservation and diversity*, 9(6), 574–584.
<http://dx.doi.org/10.1111/icad.12194>
- CCCEP (2015). Espèces sauvages 2015 : la situation générale des espèces au Canada. Conseil canadien pour la conservation des espèces en péril. Groupe de travail national sur la situation générale. Fichier Excel et Rapport. Récupéré le 01-02-2019 de <https://www.wildspecies.ca/fr/rapports>
- Chiari, S., Zauli, A., Audisio, P., Campanaro, A., Donzelli, P. F., Romiti, F., Svensson, G. P., Tini, M. et Carpaneto, G. M. (2014). Monitoring presence,

abundance and survival probability of the stag beetle, *Lucanus cervus*, using visual and odour-based capture methods : implications for conservation.

Journal of Insect Conservation, 18(1), 99–109.

<http://dx.doi.org/10.1007/s10841-014-9618-8>

Cornelisse, T. M., Bennett, M. K. et Letourneau, D. K. (2013). The implications of habitat management on the population viability of the endangered Ohlone tiger beetle (*Cicindela ohlone*) metapopulation. *PLOS ONE*, 8(e71005), 8. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0071005>

COSEPAC (2009). Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur la Cicindèle verte à lunules (*Cicindela patruela*) au Canada. Comité sur la situation des espèces en péril au Canada. Ottawa. vii + 39 p. Récupéré le 01-02-2019 de <http://www.registrelep.gc.ca>

Duchesne, P. et Charlebois, D. Y. (2013). CaractÉrisation du territoire agricole : Rapport. MRC Pontiac. Récupéré le 15-10-2019 de <https://www.mrcpontiac.qc.ca/wp-content/uploads/Rapport-Characterisation-agricole-FR.pdf>

Dueser, R. D. et Shugart, H. H. (1978). Microhabitats in a Forest-Floor Small Mammal Fauna. *Ecology*, 59(1), 89–98.

<http://dx.doi.org/10.2307/1936634>

ECCC (2013). Environment and Climate Change Canada : Recovery Strategy for the Cobblestone Tiger Beetle (*Cicindela marginipennis*) in Canada [Proposed]. Species at Risk Act. Recovery Strategy Series. Ottawa. v + 17 p. Récupéré le 01-02-2019 de https://www.sararegistry.gc.ca/virtual_sara/files/plans/rs_cobblestone_tiger_beetle_e_proposed.pdf

ECCC (2016). Environment and Climate Change Canada : Recovery Strategy for the Northern Barrens Tiger Beetle (*Cicindela patruela*) in Canada [Proposed]. Species at Risk Act. Recovery Strategy Series. Ottawa. vi + 27 p. Récupéré le 01-02-2019 de https://wildlife-species.canada.ca/species-risk-registry/document/default_e.cfm?documentID=2889

Emlen, S. T. et Oring, L. W. (1977). Ecology, sexual selection, and the evolution of mating systems. *Science*, 197(4300), 215–223.

Evans, A. V. (2014). *Beetles of Eastern North America*. Princeton University Press. 560 p.

Farrell, T., Copeland, C. et Bahlai, C. (2011). Recovery Strategy for the Northern Barrens Tiger Beetle (*Cicindela patruela*) in Ontario. Ontario Recovery Strategy Series. Prepared for the Ontario Ministry of Natural

Resources, Peterborough, Ontario. vi + 18 pp.

Fretwell, S. D. (1972). *Population in a seasonal environment*. Princeton : Princeton University Press. 224 pp.

Government Canada (2019). List of Wildlife Species at Risk. Justice Laws Website. Species at Risk Act - Schedule 1 (S.C. 2002, c. 29). 112 p.
Récupéré le 01-02-2019 de
<https://laws.justice.gc.ca/eng/acts/S-15.3/page-17.html>

Hallmann, C., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., Schwan, H. et al. (2017). More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLOS ONE*, *12*(10) :e0185809, 21 p.
<http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>

Harris, J. E., Rodenhouse, N. L. et Holmes, R. T. (2019). Decline in beetle abundance and diversity in an intact temperate forest linked to climate warming. *Biological Conservation*, *240*, 8 p.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108219>.

Herberstein, M. E., Painting, C. J. et Holwell, G. I. (2017). Scramble competition polygyny in terrestrial arthropods. *Advances in the Study of Behavior*, *49*, 237–295. <http://dx.doi.org/10.1016/bs.asb.2017.01.001>

Hudgins, R., Norment, C., Schlesinger, M. et Novak, P. (2011). Habitat Selection and Dispersal of the Cobblestone Tiger Beetle (*Cicindela marginipennis* Dejean) along the Genesee River, New York. *The American Midland Naturalist*, *165*(2), 304–318. Récupéré le 30-06-2019 de
<http://www.jstor.org/stable/41288667>

Jaskula, R. (2005). Mandible sexual dimorphism in *Cicindela hybrida hybrida* (Cicindelidae). *Protection of Coleoptera in the Baltic Sea Region*, 233–239. Récupéré le 30-06-2019 de
<https://www.researchgate.net/publication/259234434>

Jayaweera, A. et Barry, K. (2017). Male antenna morphology and its effect on scramble competition in false garden mantids. *The Science of Nature*, *104*(75), 9 p. <http://dx.doi.org/10.1007/s00114-017-1494-0>

Johnson, H. E., Scott Mills, L., Wehausen, J. D. et Stephenson, T. R. (2010). Combining ground count, telemetry, and mark–resight data to infer population dynamics in an endangered species. *Journal of Applied Ecology*, *47*, 1083–1093. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01846.x>

Kinsley, B. (2014). *Cicindela marginipennis*. The IUCN Red List of

- Threatened Species 2014 : e.T4851A21424216. 1–9.
<http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2014-1.RLTS.T4851A21424216.en>
- Knisley, C. B., Schultz, T. D. et Hasewinkel, T. H. (1990). Seasonal activity and thermoregulatory behavior of *Cicindela patruela* (Coleoptera : Cicindelidae). *Annals of the Entomological Society of America*, 83(5), 911–915. <http://dx.doi.org/10.1093/aesa/83.5.911>
- Kritsky, G. et Simon, S. (1995). Mandibular sexual dimorphism in *Cicindela Linnaeus* (Coleoptera : Cicindelidae). *The Coleopterists' Bulletin*, 49(2), 143–148. Récupéré le 30-06-2019 de <https://www.jstor.org/stable/4008976>
- Lajoie, P. G. (1962a). Cartes des sols des comtés de pontiac et gatineau, québec. Renseignements sur les sols, compilé par le Service de Recherches, Ministère fédéral de l'agriculture, en collaboration avec le collègue Macdonald et le Ministère provincial de l'agriculture, Québec. Récupéré le 15-10-2019 de <http://sis.agr.gc.ca/siscan/publications/surveys/pq/pq24/index.html>
- Lajoie, P. G. (1962b). Étude pédologique des comtés de Gatineau et de Pontiac, Québec. Service de Recherches, Ministère fédéral de l'agriculture, en collaboration avec le collègue Macdonald et le Ministère provincial de l'agriculture, Québec. 103 p. Récupéré le 15-10-2019 de <http://sis.agr.gc.ca/siscan/publications/surveys/pq/pq24/index.html>
- Legendre, P. et Legendre, L. (1998). *Numerical Ecology, Second English Edition*. Amsterdam : Elsevier Science. x + 853 pp. Récupéré de https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/417/o/Numerical_Ecology.pdf?1458165083
- Mawdsley, J. R. (2005). Extirpation of a population of *Cicindela Patruela Dejean* (Coleoptera : Carabidae : Cicindelini) in Suburban Washinton, DC, USA. *Proceedings of the Entomological Society of Washington*, 107(1), 64–70.
- McCartney, J., Armstrong, D. P., Gwynne, D. T., Kelly, C. D. et Barker, R. J. (2006). Estimating abundance, age structure and sex ratio of a recently discovered New Zealand tusked weta *Motuweta riparia* (Orthoptera, Anostostomatidae), using mark-recapture analysis. *New Zealand Journal of Ecology*, 30(2), 229–235.
- McKinney, M. L. (1999). High rates of extinction and threat in poorly studied taxa. *Conservation Biology*, 13(6), 1273–1281.
- Municipalité de l'Isle-Aux-Allumettes (2017). Démographie. Récupéré le

- 10-05-2019 de <http://www.isle-aux-allumettes.com/municipalite/demographie.php>
- NatureServe Explorer (2009). *Cicindela patruela patruela*. Récupéré le 14-01-2020 de <http://explorer.natureserve.org/>
- Nicolas, G. et Sillans, D. (1989). Immediate and latent effects of carbon dioxide on insects. *Annual Review of Entomology*, 34(1), 97–116. <http://dx.doi.org/doi:10.1146/annurev.en.34.010189.000525>
- Pearson, D. L., Knisley, C. B., Duran, D. P. et Kazilek, C. J. (2015). *A Field Guide to the Tiger Beetles of the United States and Canada : Identification, Natural History, and Distribution of the Cicindelinae*. Oxford University Press. 232 p.
- Pearson, D. L., Knisley, C. B. et Kazilek, C. J. (2006). *A field Guide to the Tiger Beetles of the United States and Canada*. Oxford University Press. 227 p.
- Pearson, D. L. et Vogler, A. P. (2001). *Tiger beetles : the evolution, ecology, and diversity of the cicindelids*. Cornell University Press. 352 p.
- Pinery Provincial Park (2019a). Information available at the Visitors Centre. Ontario Parks.
- Pinery Provincial Park. (2019b). *The Friends of Pinery Park*. Ontario Parks. Récupéré le 15-04-2019 de <https://pinerypark.on.ca>
- Poinapen, D., Konopka, J. K., Umoh, J. U., Norley, C. J. D., McNeil, J. N. et Holdsworth, D. W. (2017). Micro-CT imaging of live insects using carbon dioxide gas-induced hypoxia as anesthetic with minimal impact on certain subsequent life history traits. *BioMed Central Zoology*, 2(9), 1–13. <http://dx.doi.org/10.1186/s40850-017-0018-x>
- R Core Team (version 4.0.4 (2021)). *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria
- Rasband, W. (2018). ImageJ 1.52a. National Institutes of Health, USA. Récupéré de <http://imagej.nih.gov/ij>
- Saint-Germain, M. (2017). Délimitation de l'habitat et estimation de la population de la Cicindèle verte des pinèdes (*Cicindela patruela* Dejean) sur l'île aux Allumettes, Québec - inventaire 2017. Produit pour le Service Canadien de la Faune, Environnement et Changement Climatique Canada. 27 pp.

- Sanchez-Bayo, F. et Wyckhuys, K. A. (2019). Worldwide decline of the entomofauna : A review of its drivers. *Biological Conservation*, 232, 8–27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020>
- Schlesinger, M. D. et Novak, P. G. (2011). Status and conservation of an imperiled tiger beetle fauna in New York State, USA. *Journal of Insect Conservation*, 15(6), 839–852. <http://dx.doi.org/10.1007/s10841-011-9382-y>
- Schultz, T. D. (1998). The utilization of patchy thermal microhabitats by the ectothermic insect predator, *Cicindela sexguttata*. *Ecological Entomology*, 23(4), 444–450. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2311.1998.00154.x>
- Schwagmeyer, P. L. (1988). Scramble-Competition Polygyny in an Asocial Mammal : Male Mobility and Mating Success. *The American Naturalist*, 131(6), 885–892. <http://dx.doi.org/10.1086/284828>
- Schwarz, C. J. et Arnason, A. N. (1996). A General Methodology for the Analysis of Capture-Recapture Experiments in Open Populations. *Biometrics*, 52(3), 860–873. <http://dx.doi.org/10.2307/2533048>
- Shortall, C. R., Moore, A., Smith, E., Hall, M. J., Woiwod, I. P. et Harrington, R. (2009). Long-term changes in the abundance of flying insects. *Insect Conservation and Diversity*, 2(4), 251–260. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-4598.2009.00062.x>
- Stanley, T. R. et Richards, J. D. (2005). Software review : a program for testing capture-recapture data for closure. *Wildlife Society Bulletin*, 33(2), 782–785. [http://dx.doi.org/10.2193/0091-7648\(2005\)33\[782:SRAPFT\]2.0.CO](http://dx.doi.org/10.2193/0091-7648(2005)33[782:SRAPFT]2.0.CO)
- Tellier, G. et Charlebois, D. Y. (2013). Caractérisation du territoire agricole : Annexe cartographique. MRC Pontiac. Récupéré le 15-10-2019 de https://www.mrcpontiac.qc.ca/wp-content/uploads/Annexe-cartographique_C-FR.pdf
- Thornhill, R. et Alcock, J. (1983). *The evolution of insect mating systems*. Harvard University Press. x + 547 pp.
- UICN (2019). Rapport annuel 2018. Union internationale pour la conservation de la nature. Gland, Suisse. Récupéré le 18-02-2021 de <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/2019-007-Fr.pdf>
- UICN (2020). Rapport annuel 2019. Union internationale pour la

conservation de la nature. Gland, Suisse. Récupéré le 18-02-2021 de <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2020-025-Fr.pdf>

Wagner, D. L., Grames, E. M., Forister, M. L., Berenbaum, M. R. et Stopak, D. (2021). Insect decline in the Anthropocene : Death by a thousand cuts. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 118(2), 10. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.2023989118>

Watt, W. B., Chew, F. S., Snyder, L. R., Watt, A. G. et Rothschild, D. E. (1977). Numbers and Movements of Some Montane *Colias* Species. *Oecologia*, 27(1), 1–22. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00345682>

White, G., Burnham, K., Otis, D. et Anderson, D. (1978). Users manual for program capture. Utah State Univ. Press, Logan, Utah. Récupéré le Janv-2020 de <https://www.mbr-pwrc.usgs.gov/software/capture.shtml>

Willis, E. R. et Roth, L. M. (1949). A microscope stage for continuous anesthesia of insects. *Science*, 109(2827), 230–230. <http://dx.doi.org/10.1126/science.109.2827.230>

Willis, H. (2001). Zoogeography of *cicindela patruela* in wisconsin (coleoptera : Cicindelidae). *Cicindela*, 33(1-2), 1–18.

WWF-Canada (2020). Planète vivante Canada 2020 : Espèces en péril. Par J. Currie and J. Snider and E. Giles. Toronto, Canada. Récupéré le 18-02-2021 de https://wwf.ca/wp-content/uploads/2020/09/WWF-7-x-9-LPRC_Fre-2.pdf