



Programme Agri-science – Volet des projets

Rapport final sur le rendement

Ce gabarit comprend le rapport annuel sur le rendement pour la dernière année du projet et comprend deux questions supplémentaires pour le rapport final sur le rendement.

Section A: Rapport annuel sur le rendement

Cette section est la même que celle qui figure dans les rapports annuels précédents achevés à ce jour et vise à ne saisir que les résultats qui ont été obtenus au cours de la dernière année du projet.

Nom du bénéficiaire : Centre de Recherche Agroalimentaire de Mirabel (CRAM)	
Titre du projet : Alternatives pour la gestion des ennemis des cultures en horticulture	
Numéro du projet : ASP-009	Dernière période visée par le rapport : 2022-04-01 à 2023-03-31
Date de début du projet : 2018-04-30	Date de fin du projet : 2023-03-31



Numéro de l'activité (EC) : 10

Nom(s) de l'activité : Impact des méthodes de lutte sur l'évolution et la virulence des populations de la punaise terne. Ce projet concentre sur la culture des fraises- Volet 1

Chercheur principal : François Dumont

Résumé de l'activité

Veillez fournir un résumé général de l'activité. Vous devez inclure une introduction, les objectifs, la méthode, les produits livrables, les résultats obtenus et une discussion. Vous pouvez utiliser un langage technique.



Impact des méthodes de lutte sur l'évolution et la virulence des populations de la punaise terne.

Introduction

La punaise terne *Lygus lineolaris* (Palisot de Beauvois) (Hemiptera : Miridae) empêche le développement normal des fraises dans les champs et diminue leur valeur commerciale [1–4]. La présence de punaises ternes sur les fraisiers génère donc des pertes économiques considérables. On diminue la densité de ces insectes nuisibles en appliquant des insecticides (e.g., pyréthrinoides; [5–8]), mais leur efficacité varie d'une population à l'autre [6]. Ces insecticides tuent également d'autres insectes et perturbent ainsi le fonctionnement des écosystèmes agricoles [9]. En alternative, la lutte biologique à l'aide de prédateurs ou parasitoïdes a été développée dans les dernières années.

Ces méthodes de lutte chimique et biologique peuvent entraîner des conséquences inattendues pour les populations parce qu'elles amènent ces insectes à évoluer [10–12]. Dans certains cas, l'évolution qui résulte des méthodes de lutte diminue leur efficacité quand les insectes développent des résistances physiologiques ou comportementales. Les punaises ternes pourraient par exemple devenir résistantes aux insecticides [7,13–16]. Dans d'autres cas, cette évolution accentue l'impact économique des insectes [12]. En élevant la mortalité, les insecticides pourraient par exemple amener les insectes à avoir une vie plus courte mais une voracité et une capacité à se multiplier plus élevées [17,18].

Pour prédire et minimiser les effets des méthodes de lutte sur l'évolution des punaises ternes, il faut quantifier a) la sélection exercée par ces méthodes de lutte sur les caractéristiques de la punaise terne et b) la capacité de ces caractéristiques à évoluer en réponse cette sélection [19]. L'évolution des punaises ternes en réponse aux méthodes de lutte est souvent étudiée sous l'angle de réponses physiologiques aux traitements insecticides [14,16]. Cependant le comportement lui aussi peut évoluer en réponse aux méthodes de lutte, mais encore peu étudié. Des comportements tel le niveau d'activité, la dispersion et les choix alimentaires sont tous susceptibles d'être directement ou indirectement affecté par les méthodes de lutte chimique et biologique [20,21].

Objectifs

L'objectif global de ce volet est de caractériser et de mesurer le potentiel évolutif de la punaise terne dans des traits comportementaux qui sont liés à l'efficacité des méthodes de luttés destinées à réguler ses populations. Les objectifs secondaires étaient de comprendre l'évolution : a) de la dispersion locale via l'étude des performances locomotrices qui déterminent l'efficacité des méthodes de lutte utilisées contre les punaises, et b) des comportements d'exploration, et c) des comportements alimentaires qui déterminent les dommages que les punaises infligent aux récoltes. L'héritabilité des traits (ou sa limite maximale via l'estimation de la répétabilité) pour ces traits a été estimée. Nous avons quantifié la capacité des caractéristiques de la punaise terne à évoluer en réponse à la sélection en établissant des lignées génétiques en laboratoire et en utilisant une approche de génétique quantitative.

Objectif A-Variation individuelle et corrélations des performances locomotrices de marche et de grimpe de la punaise terne *Lygus lineolaris*.

Mathieu Videlier, François Dumont & Pierre-Olivier Montiglio

Résumé

La punaise terne, un important ravageur en fraisières, développe de la résistance physiologique aux pesticides utilisées pour réguler ses populations. Le développement de résistance comportementale (e.g., évitement des pesticides) est rarement étudié chez ce ravageur. Cette résistance comportementale pourrait être lié aux performances locomotrices qui modulent sa capacité à éviter les zones toxiques ou même les prédateurs. L'objectif de ce projet est de caractériser les performances locomotrices de marche et de grimpe puis d'estimer sa répétabilité pour premièrement valider les méthodes utilisées en laboratoire, puis établir la limite supérieure de l'héritabilité des performances de marche et de grimpe. Les caractères de marche et de grimpe mesurés en laboratoire sont répétables avec la présence de variation individuelle associés à ses caractères de performance. De plus, les caractères de marche et de grimpe sont



dissociés dans la population étudiée, reflétant une possible dissociation évolutive de ses caractères face aux méthodes de lutte contre ce ravageur.

Introduction

La punaise terne *Lygus lineolaris* (Palisot de Beauvois) (Hemiptera : Miridae) est un ravageur de plusieurs cultures en Amérique du Nord [13]. Cet insecte omnivore se nourrit de nombreuses plantes hôtes [22] et induit des pertes économiques conséquentes dans des productions aussi diverses que le coton, les fraises et le canola [2,4,13,23]. Différentes méthodes de régulation de ces populations ont été mises en place tel que l'utilisation de pesticides [24], de bandes pièges [25–28] ou encore l'utilisation de prédateurs ou parasitoïdes en lutte biologique classique ou de conservation [29–33]. Toutes ces méthodes ont le potentiel d'appliquer une pression de sélection sur les populations de punaises ternes [12]. En réponse à ses méthodes, les populations de punaises ternes ont notamment développées une résistance physiologiques aux insecticides [15,16,34,35], ou une résistance comportementale aux insecticides comme c'est le cas pour plusieurs autres espèces d'insectes en milieu agricole [20,21,36,37].

La résistance comportementale aux insecticides prend la forme de modification dans les choix de sites de ponte et/ou dans l'évitement des pesticides [38,39]. Ces mécanismes sont directement ou indirectement liés à la mobilité des individus [36]. Ainsi, le développement de résistance comportementale aux insecticides chez la punaise terne est susceptible d'agir sur la capacité de dispersion et la mobilité du ravageur. Or, l'information sur la capacité de dispersion et la mobilité des punaises ternes est limitée [27,28,40]. Le potentiel évolutif de ces caractéristiques, à savoir la variabilité génétique dans les populations, reste inconnue. Cependant, cette information est essentielle pour mieux comprendre la dynamique de populations et optimiser les méthodes de lutte contre ce ravageur.

En plus de la capacité de vol chez les adultes, la punaise terne est aussi connue pour se déplacer en marchant au sol ou sur les plantes [41,42]. Ces déplacements peuvent moduler le taux d'exposition aux prédateurs et parasitoïdes [27] et aux insecticides [43] à une plus fine échelle. De plus, la propension à utiliser la marche et le niveau d'activité en général pourrait être liés aux dommages aux cultures causés par un ravageur comme la punaise terne. Ainsi, connaître et comprendre la mobilité pédestre (de marche) de la punaise terne est essentielle pour, d'une part, mieux comprendre la dispersion de ce ravageur à un niveau plus local (i.e., au sein d'une plante ou au sein d'une parcelle de plantes) et, d'autre part, pour comprendre comment ce ravageur peut éviter les stratégies de lutte chimique ou biologique mise en place. En général, la mobilité peut être mesurée dans un milieu sauvage avec les inconvénients et la difficulté de suivre un individu ou un groupe d'individu dans son milieu naturelle et complexe ; ou alors la mobilité peut être perçue comme un trait de performance locomotrice en laboratoire où les individus sont mesurées pour leur mobilité maximum jusqu'à épuisement. Cette deuxième mesure (de performance locomotrices) bien qu'artificiel permet d'estimer une mobilité maximum sous stress souvent similaire à la réponse des individus face à un prédateur ou un agent toxique comme un insecticide. Ainsi les performances locomotrices reflètent généralement les patrons de fuite et est en lien direct avec la survie des individus en milieu naturelle.

De par son lien direct avec la survie des individus, les performances locomotrices sont des caractères au centre des théories d'histoire de vie [44]; ce qui en fait un caractère central dans l'étude de l'évolution des caractères [45,46]. Dépendamment de la base morphologique, musculaire, énergétique voir même génétique [47], différentes caractères de performances locomotrices peuvent être positivement associées comme la marche ou la course; ou négativement associées comme le compromis entre endurance et rapidité de la marche [48–50]. Ses associations sont importante à comprendre car elles peuvent influencer l'évolution des caractères [17]. Chez la punaise terne, (encore) peu est connu sur les performances de marche, ou même de grimpe, et leur association. Ces informations sont cependant nécessaires pour mieux comprendre la dispersion locale (au sein d'une plante et d'un champ) de ce ravageur mais aussi la façon dont elles peuvent évoluer face aux méthodes de régulation. Une augmentation de l'évitement des méthodes de régulation peut engendrer une évolution de la dispersion locale et des performances de marche et de grimpe dépendamment de leur association.



L'objectif de cette étude est de mesurer les performances de marche et de grimpe de la punaise terne, d'estimer leur répétabilité de la punaise terne, ainsi que leur corrélation (association). La répétabilité représente la proportion de la variation phénotypique associée à la variation individuelle. La présence de cette variation permet d'une part de valider la méthodologie utilisée en laboratoire en montrant que dans une certaine mesure nous observons des différences entre individus. D'autre part, cette variation individuelle permet de mettre en avant la présence d'une base génétique associée à ces caractères, car la répétabilité représente la valeur haute de l'héritabilité. De plus, la présence de variation individuelle des caractères de performance permet d'estimer leur l'association ou corrélation dite inter-individuelle (entre les individus). Cette corrélation (inter-individuelle) reflète la vraie association entre les caractères, excluant de possible biais due à la plasticité des individus ou des problèmes méthodologiques [51–53]. Ainsi, 120 individus ont été mesurés deux fois pour leur performance de marche maximale (distance et durée de marche forcée), leur distance de grimpe libre ainsi que leur performance de grimpe maximale (distance et durée de grimpe forcée).

Méthodes

Collecte et Maintenance de la population de punaise terne

Durant l'été 2021 et 2022, nous avons capturé des punaises ternes sauvages dans la région de Mirabel (Bas-Laurentides, Québec, Canada) ainsi que dans les terrains vagues dans le quartier d'Hochelaga de la ville de Montréal (Québec, Canada). Nous avons maintenu cette population dans les locaux de l'Université du Québec à Montréal (UQÀM). Les adultes ont été placés dans un pot en plastique cylindrique (950 ml) avec un morceau de papier et de laitue qui sert à la fois de refuge, de nourriture et de substrat de ponte. Ces pots ont été maintenus au sein d'une tente hydroponique à une température constante (~ 22 °C) et une humidité relative constante (~ 50 %) avec un cycle de lumière de 16 heures. Trois fois par semaine, la laitue a été remplacée et les pots nettoyés. Nous avons isolé les laitues des pots d'adultes pour former la nouvelle génération de punaises ternes au sein du laboratoire. En général, le temps de développement de l'œuf à l'adulte reproducteur est d'environ un mois.

Mesure de performance locomotrice

Les nouveaux adultes émergeant de la dernière phase de métamorphose ont été isolés et phénotypés pour déterminer leur sexe. Pour chaque bloc de mesure, 10 mâles et 10 femelles sont ainsi isolés et phénotypés aléatoirement pour leur performance locomotrice. Au total, 120 punaises adultes ont été mesurées deux fois avec une semaine d'écart sur 10 blocs de mesure, au sein d'une tente hydroponique.

Pour chaque bloc, les individus phénotypés pour leur performance de marche (distance et temps de marche forcée) puis pour la performance de grimpe (distance de grimpe libre pendant 30 secondes), suivi d'une mesure de leur seconde mesure de performance de grimpe (distance et temps de grimpe forcée). Deux arènes ou tubes de chaque type sont utilisés et nettoyés avec l'alcool entre chaque utilisation (Figure 1). Pour mesure la performance de marche, nous avons utilisé une arène circulaire en plastique de 15 cm de long. L'individu a été motivé à marcher en le dérangeant avec un pinceau. La distance et le temps de marche ont été enregistrés jusqu'à ce que l'individu soit incapable de bouger. Tous les individus ont été phénotypés pour leur marche à la suite de façon aléatoire, permettant aux individus de se reposer après ce test.

À la suite des mesures de performance de marche, deux tests de performance de grimpe ont été effectués. Le premier test mesure la performance de grimpe libre pendant 30 secondes à l'aide d'un cylindre gradué transparent (1L). L'individu a été placé sous le cylindre inversé et nous avons mesuré la distance totale parcourue pendant 30 secondes. Immédiatement après, un test de grimpe forcée a été effectué à l'aide d'un petit tube Eppendorf gradué transparent (50 ml) avec un côté couvert d'un fond blanc. L'individu a été placé sous le tube inversé. Dès qu'il atteignait le haut du tube, celui-ci était secoué pour faire tomber la punaise, permettant ainsi à l'individu de continuer à grimper. La distance et le temps de grimpe ont été enregistrés jusqu'à ce que l'individu soit incapable de grimper même après stimulation avec le pinceau.

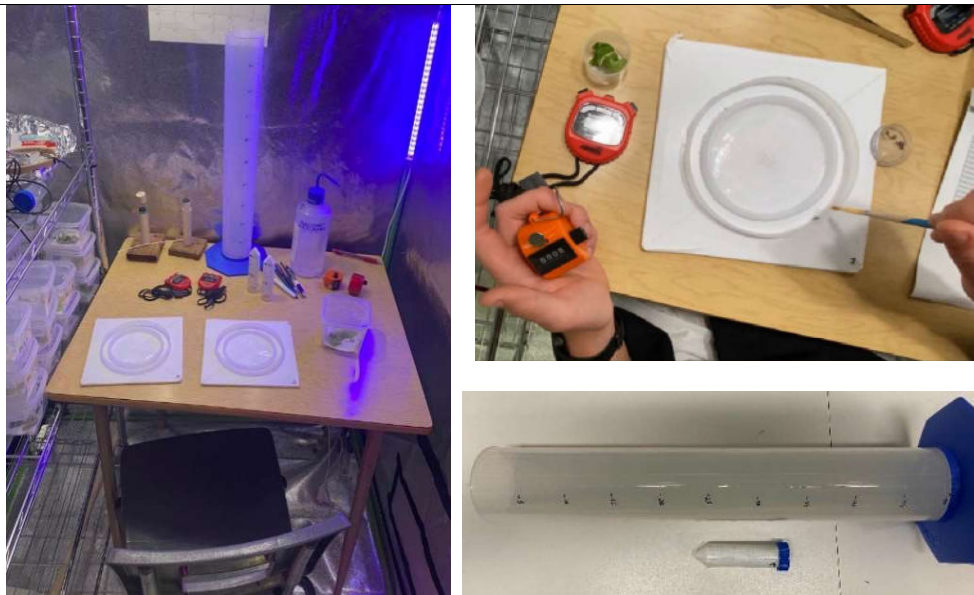


Figure 1. Ensemble du matériel pour mesurer les performances locomotrices. La photo de droite en haut montre l'arène circulaire pour les mesures de marche, la photo de droite en bas montre les deux cylindres pour les mesures de grimpe.

Analyse statistique

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées sur le programme R version 4.2.1 [54] avec l'utilisation de la librairie *brms* [55]. Toutes les variables continues ont été standardisées pour une moyenne de 0 et un écart type de 1. La variable de distance de grimpe libre est log-transformée au préalable pour la rendre gaussienne. L'ensemble de l'analyse statistique est organisé en deux parties : une analyse multivariée de la population globale et une analyse par sexe.

En premier, nous avons utilisé un modèle multivarié mixte pour estimer la variance individuelle de chaque caractère (distance totale de marche forcée, durée totale de marche forcée, log de la distance de grimpe libre, distance totale de grimpe forcée et durée totale de grimpe forcée), ainsi que les corrélations inter-individuelles (r_{ind}) et corrélations intra-individuelles ou résiduelles (r_e). Le modèle inclut comme effets fixes le sexe, l'identité de l'arène ou du cylindre, l'ordre de mesure, l'heure de chaque mesure (premier et second ordre) ainsi que la température et l'humidité relative au moment de la mesure. Pour les caractères liés à la marche, nous avons ajouté si oui ou non l'individu avait déféquer pendant la mesure. Le modèle multivarié mixte inclut également comme effet aléatoire l'identité de l'individu (ID) ainsi que le bloc de mesures (BLOCK). Le modèle est conçu pour estimer les covariances (et corrélations) uniquement pour l'effet aléatoire ID.

Deuxièmement, nous avons utilisé deux modèles similaires au premier, mais en séparant les femelles et les mâles pour estimer les corrélations au sein de chaque sexe. Pour ces modèles, l'effet fixe du sexe sont enlevées.

Résultats

Performance locomotrice : description statistique

Dans le premier test de performance, la punaise terne marche au maximum 920 cm pendant 10 minutes avant épuisement avec en moyenne 600 cm parcourue (tableau 1). Aucun dimorphisme sexuel n'est détecté ni sur la distance ou la durée de marche forcée. De plus, aucun effet du temps ni d'autres facteurs environnementaux n'affecte les performances de marche de la punaise terne (Tableau S1).

Dans le second test de performance, la punaise terne grimpe librement d'environ 14 cm en 30 secondes, mais augmente leur performance de grimpe jusqu'à un maximum de 490 cm avant épuisement s'ils sont



forcés à grimper (Tableau 1). De même, aucun dimorphisme sexuel n'est détecté pour les performances de grimpe. Cependant nous détectons un effet en cloche du temps de mesure sur la distance de grimpe forcée, ou les individus grimpent jusqu'à épuisement plus haut au cours de la journée et moins au début et la fin de journée (Temps : 0,733 [0,35 ; 1,19], Temps² : -0.903 [-1.362; -0.370], Tableau S1).

Finalement, nous observons une diminution significative de toutes les performances locomotrices sur la deuxième prise de mesure (Tableau S1).

Tableau 1. Description statistique des différents caractères de performance de marche et de grimpe.

Caractères	Sexe	Moyenne	Écart-Type	Minimum	Maximum
Marche Distance (cm)	Global	597.857	190.744	120.000	920.000
	Femelle	552.021	180.611	170.000	910.000
	Male	646.818	191.065	120.000	920.000
Marche Durée (min)	Global	7.156	1.643	2.090	10.410
	Femelle	7.025	1.462	4.230	10.320
	Male	7.297	1.823	2.090	10.410
Grimpe Distance libre (cm)	Global	14.223	8.842	0.000	40.000
	Femelle	13.688	8.794	0.000	32.000
	Male	14.783	8.954	0.000	40.000
Grimpe Durée (min)	Global	8.043	1.787	2.300	12.480
	Femelle	7.909	1.886	2.300	12.480
	Male	8.182	1.687	5.140	11.420
Grimpe Distance (cm)	Global	265.745	99.661	0.000	490.000
	Femelle	244.375	90.411	0.000	440.000
	Male	288.043	104.852	100.00	490.000

Variance individuelle et répétabilité des performances

Au niveau populationnel, nous détectons de la variation individuelle (avec cependant une large incertitude) pour chaque mesure de performance. Les scores de répétabilité varient entre 0.127 avec un intervalle de crédibilité de [0,001; 0,348] pour la durée de grimpe forcée à 0.540 avec un intervalle de crédibilité de [0,150; 0,765] pour la distance de marche forcée (Figure 2).

Étonnamment, les points d'estimés de la répétabilité des performances des femelles sont en général plus faible que celle de la population générale ou que celle des mâles. Cependant les intervalles de crédibilités se chevauchent démontrant aucunes différences significatives sur la répétabilité des performances entre les mâles et les femelles. Nous observons aussi que certains scores de répétabilité des femelles est non significative (chevauchement des intervalles de crédibilité avec 0) comme pour le cas des durées de marche forcée ou de grimpe forcée (Figure 2).

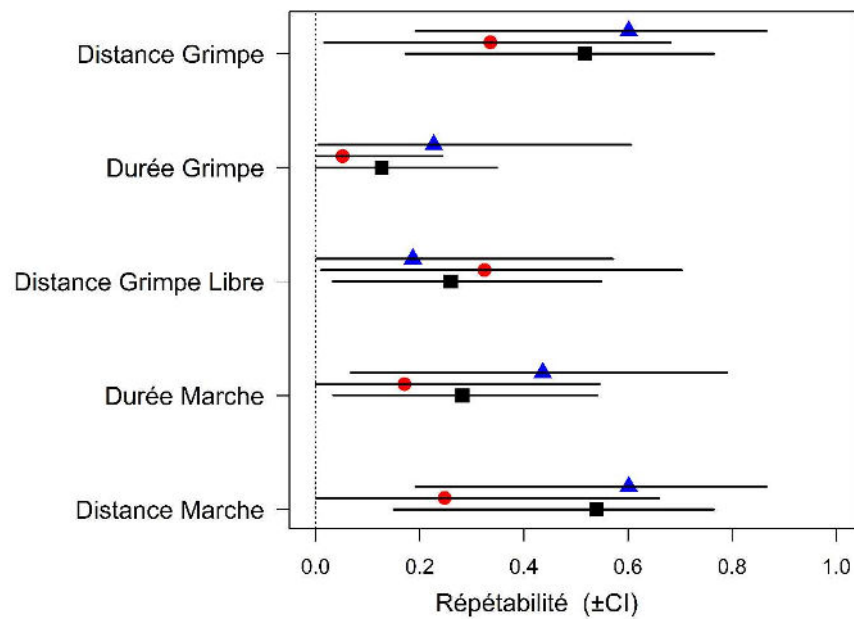


Figure 2. Répétabilité des mesures de performance de marche forcée et de grimpe libre et forcée. Les carrés noirs représentent la répétabilité associée à la population globale, les cercles rouges celle de femelles et les triangles bleu celle des mâles. Chaque estimation est accompagnée de son intervalle de crédibilité.

Corrélation entre les caractères au niveau global et pour chaque sexe.

Au niveau populationnel, nous observons une dissociation des performances de marche et de grimpe avec des estimations des corrélations inter et intra-individuelles proches de 0 (Figure 3, Tableau S2). Les corrélations inter-individuelles au sein des performances de marche sont positives et significatives, ce qui signifie que les individus qui marchent le plus loin sont ceux qui marchent le plus longtemps. Nous observons la même chose pour les corrélations intra-individuelles (ou résiduelle), ce qui signifie que les individus qui varient le plus dans leur distance de marche sont ceux qui varient le plus dans leur durée de marche (Tableau S2). Une tendance similaire est observée au sein des performances de grimpe forcée pour les corrélations intra-individuelles (Tableau S2). Cependant l'incertitude pour les caractères associée aux performances de grimpe (libre ou forcée) sont large, rendant les corrélations inter-individuelles positive non significatives (Figure 3, Tableau S2).

En dissociant les corrélations par sexe et réduisant la taille d'échantillon, nous avons de façon indirectement gonflé l'incertitude des différentes corrélations, rendant la plupart de ces corrélations non significatives. Cependant, le patrons des points d'estimation des corrélations reste constant avec des corrélations positives au sein de la distance et de la durée de la même performance et des corrélations proche de zéro entre les performances de grimpe et de marche (figure 3).

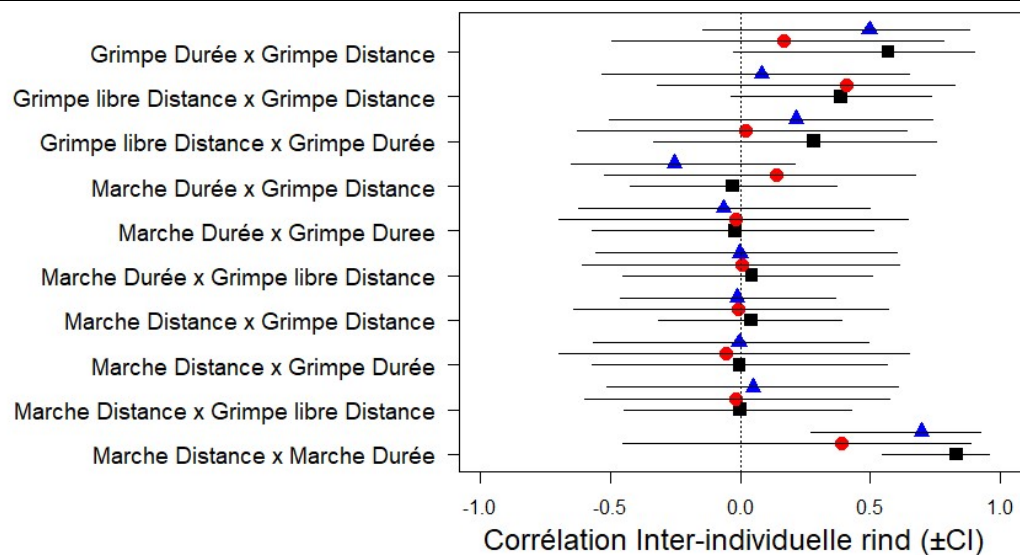


Figure 3. Corrélation inter-individuelle des performances locomotrices de marche et de grimpe (libre ou forcée). Les carrés noirs représentent les corrélations associées à la population globale, les cercles rouges celle de femelles et les triangles bleu celle des mâles. Chaque corrélation est accompagnée de son intervalle de crédibilité.

Discussion

Au sein de nos tests en laboratoire, la population de punaise terne présente des différences entre les individus (variation individuelle) dans leur performance de marche forcée (durée et distance) et de grimpe libre ou forcée (durée et distance), avec des scores de répétabilité variant de 0.2 à 0.6. Cette variation est aussi présente chez les mâles mais plus faible voir non significatif chez les femelles. De plus, les performances de marche ou de grimpe semble être dissociée au sein de la population étudiée, avec des corrélations inter-individuelles proche de zéro autant dans la population globale que pour chaque sexe.

Au niveau populationnel, nous observons aucun dimorphisme sexuel dans leur performance de marche ou de grimpe chez ce ravageur. Cependant, il est noté que dans son ensemble les performances locomotrices sont réduites lors du deuxième test. Ce résultat peut être due à deux raisons : il est possible que les individus se sont habitués aux stimulus du test et donc réduisent leurs performances ; ou alors l'âge des individus ou la senescence influencent grandement leur performance. Cependant, il est impossible de pouvoir dissocié ces deux hypothèses dans le cadre de notre expérience ou nous n'avons pas fait fluctuer l'âge de nos individus.

Les scores de répétabilité varient entre 0.2 et 0.6, ce qui reflète que dans une certaine mesure les individus performant constamment de la même façon à travers nos tests. Cette information permet ainsi de valider notre méthodologie [53]. De plus, elle permet aussi de confirmer que l'évolution peut transformer ces caractères, car la répétabilité représente la valeur supérieure de la variance génétique ou de l'héritabilité [56–58]. La possible présence d'une base génétique des caractères de performance est nécessaire pour que ces caractères répondent à la sélection [58]. De plus, la présence d'une variation individuelle constitue le matériel de base ciblé par la sélection [17,58]. Si les différences entre les individus dans leur performance sont associées à des différences dans leur fitness alors ce caractère est directement soumis à la sélection. On peut s'attendre à ce que les caractères de performance soient sous sélection pour plusieurs raisons : d'une part les performances locomotrices reflètent la dispersion maximale d'un individu et elles sont essentielles pour la mobilité des individus au niveau local d'un champ ou d'une parcelle de terrain et donc leur accessibilité aux ressources. D'autre part, avec l'utilisation des insecticides dans les champs cultivés, les punaises adultes qui se disperse le plus ou le plus loin peuvent ainsi éviter ou alors réduire leur exposition aux agents de régulation des zones traitées et ainsi survivent plus que ceux qui se disperse moins ou moins loin. De plus, il est également connu que les performances locomotrices sont central pour échapper ou fuir les prédateurs [59] présents dans l'environnement ou ajoutés également comme agents de régulation biologique des ravageurs. Ainsi la présence de variation



individuelle dans les performances de marche et de grimpe met en avant la possibilité pour l'évolution de modifier ces caractères, ainsi les punaises peuvent s'adapter aux agents de régulation biologique des ravageurs et développer une résistance comportement. Cependant une meilleure compréhension de la base génétique ou des pressions de sélection en nature est nécessaire pour pouvoir prédire comment les performances de marche et de grimpe peuvent évoluer.

En outre, une des pièces du puzzle évolutive est maintenant connu. Pour cette population de punaise terne étudiée, les performances de marche et de grimpe sont complètement dissociées avec des corrélations inter-individuelles proche de zéro autant dans la population globale que pour chaque sexe. Ce résultat est assez surprenant, car la marche et la grimpe mobilise les même membres locomoteur (membres prothoracique, mésothoracique, métathoracique) de la punaise terne. Cependant chez d'autre insecte comme le cafard, la grimpe demande que les membres avant (ou prothoracique) se comportent comme des bras et réalisent une rotation en plus d'avoir une activité neurale différente des membres arrières [60,61]. De plus, il a également été démontré, chez le cafard, que la grimpe demande des coûts énergétiques plus conséquents avec une augmentation de deux à trois fois le coût physiologique sur des surface verticales [62]. Malgré le peu d'informations sur la cinétique de la locomotion de la punaise terne, il est possible que l'allocation énergétique ou musculaire soit différente entre la marche et la grimpe expliquant ainsi la dissociation des performances entre ces deux modes de locomotion. Cette dissociation reflète aussi la possibilité pour ces deux caractères d'évoluer de façon indépendante. Ainsi les performances de marche peuvent se modifier due a la sélection alors que celle de grimpe peut rester stable à travers le temps, et vice et versa. Lequel de ses deux caractères de performance pédestre est associée directement à une augmentation de l'évitement des insecticides dans les champs et produire une résistance comportementale est encore un inconnu. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre les effets des insecticides sur les performances locomotrice.

Pour conclure, cette étude contribue à une meilleure compréhension des performances locomotrice de marche et de grimpe du ravageur *L. lineolaris*. Malgré une grande incertitude sur certaines estimations de répétabilité et corrélation, nous observons des patrons émergés dans cette étude. Toutefois, une augmentation de la taille d'échantillon pourrait affiner nos résultats. En outre, il sera intéressant d'intégrer des données morphologiques pour mieux comprendre et expliquer la variation observée sur les caractères de performance de marche et de grimpe. Il sera intéressant également de poursuivre cette étude en mesurant également les performances de vol pour compléter notre compréhension de la mobilité de ce ravageur. Nous pourrions nous attendre à mettre en évidence des compromis entre les performances aériennes et terrestres dans cette espèce comme les deux locomotions demandent la mobilisation de différents muscles.

Information supplémentaire – Variation individuelle et corrélation des performances locomotrices de marche et de grimpe de la punaise terne *Lygus lineolaris*.

Tableau S1. Source de variance des différentes performances locomotrices (a) distance et b) durée de marche forcée, c) distance de grimpe libre, d) distance et e) durée de grimpe forcée). Les effets en gras sont statistiquement significatifs avec des intervalles de crédibilité (CI) qui n'incluent pas le 0.

Caractère	Source	Estimation	CI Low	CI Up
a) Distance Marche forcée				
	Intercept	0.247	-0.284	0.757
	Sexe (M)	0.451	-0.054	0.906
	Time	-0.034	-0.221	0.144
	Time ²	-0.051	-0.370	0.238
	Arène	-0.078	-0.383	0.189
	Température	0.045	-0.157	0.234
	Relative Humidité	0.045	-0.345	0.393
	Fèces (Y)	0.220	-0.067	0.509



		Trial (2)	-1.005	-1.332	-0.652
b)	Durée	Marche forcée			
		Intercept	0.389	-0.457	1.271
		Sexe (M)	0.128	-0.269	0.522
		Time	-0.227	-0.443	-0.028
		Time ²	0.025	-0.316	0.367
		Arène	-0.017	-0.321	0.292
		Température	-0.005	-0.205	0.190
		Relative Humidité	0.165	-0.335	0.710
		Fèces (Y)	0.113	-0.202	0.401
		Trial (2)	-1.040	-1.503	-0.621
c)	Log	Distance Grimpe libre			
		Intercept	0.717	-0.323	1.941
		Sexe (M)	0.223	-0.268	0.728
		Time	0.032	-0.765	0.666
		Time ²	-0.437	-1.017	0.106
		Arène	-0.073	-0.442	0.297
		Température	-0.062	-0.448	0.330
		Relative Humidité	0.222	-0.159	0.590
		Trial (2)	-0.755	-1.336	-0.208
d)	Durée	Grimpe forcée			
		Intercept	1.024	0.238	1.803
		Sexe (M)	0.124	-0.284	0.507
		Time	-0.057	-0.521	0.487
		Time ²	-0.382	-0.903	0.130
		Arène	-0.154	-0.490	0.192
		Température	-0.063	-0.355	0.261
		Relative Humidité	0.295	-0.007	0.606
		Trial (2)	-1.272	-1.737	-0.745
e)	Distance	Grimpe forcée			
		Intercept	1.156	0.456	1.943
		Sexe (M)	0.390	-0.062	0.836
		Time	0.733	0.345	1.186
		Time²	-0.903	-1.362	-0.494
		Arène	-0.081	-0.369	0.200
		Température	0.126	-0.117	0.370
		Relative Humidité	0.334	0.091	0.562
		Trial (2)	-0.813	-1.210	-0.435



Tableau S2. Corrélation inter-individuelle et résiduelle (ou intra-individuelle) des performances locomotrices au niveau populationnel. CI représente l'intervalle de crédibilité supérieur (Up) et inférieur (Low) de chaque estimation de corrélation. Pour aider la visualisation, les titre des caractères associés aux performances de marche sont colorés en rouge, alors que ceux des performances de grimpe en bleu.

Caractère 1	Caractère 2	Corrélation inter-individuelle (r_{ind})			Corrélation résiduelle (r_e)		
		Est.	CI Low	Ci Up	Est.	CI Low	Ci Up
Distance Marche	Durée Marche	0.843	0.437	0.972	0.636	0.417	0.810
Distance Marche	Distance Grimpe libre	-0.001	-0.484	0.472	0.186	-0.102	0.483
Distance Marche	Distance Grimpe force	0.010	-0.595	0.602	0.124	-0.172	0.400
Distance Marche	Durée Grimpe force	0.060	-0.357	0.447	-0.019	-0.334	0.301
Durée Marche	Distance Grimpe libre	0.033	-0.508	0.545	0.119	-0.185	0.411
Durée Marche	Distance Grimpe force	-0.020	-0.617	0.647	-0.081	-0.366	0.210
Durée Marche	Durée Grimpe force	-0.032	-0.499	0.396	-0.060	-0.349	0.253
Distance libre	Grimpe Distance Grimpe force	0.339	-0.346	0.846	0.118	-0.162	0.372
Distance libre	Grimpe Durée Grimpe force	0.433	-0.054	0.798	0.333	0.029	0.596
Distance force	Grimpe Durée Grimpe force	0.637	-0.028	0.946	0.361	0.100	0.596

Objectif B- Matrice de (co)variance génétique du comportement exploratoire et de la masse corporelle chez une espèce d'insecte nuisible *Lygus lineolaris*.

Mathieu Videlier, François Dumont & Pierre-Olivier Montiglio

Résumé

La punaise terne est un important ravageur en Amérique du Nord. Pour limiter et réguler les populations de ravageur, les producteurs ont mise en place de nombreuses méthodes de lutte. En réponse a ses méthodes, les populations de punaise terne peut développer des résistances physiologiques mais aussi comportementale. Cependant il est encore mal connu comme ce ravageur se comporte et développe une résistance comportementale. L'objective de cette étude est de caractériser le comportement d'exploration de la punaise terne, plus spécifiquement sa base génétique pour mieux comprendre le potentielle évolutive du comportement d'exploration. De plus, nous avons examiné les associations génétiques entre le comportement et la masse, mais entre les sexes en examinant la matrice génétique G et G_{fm} . Le comportement et la masse sont héritable à un faible niveau reflétant le faible potentiel évolutif de ces caractères. De plus, la masse et le comportement sont associés génétiquement démontrant l'évolution commun. Les associations génétiques entre les sexes sont faible démontrant que les sexes ont le potentiel d'évoluer séparément dans cette population.

Introduction

Les espèces nuisibles en milieu agricole endommagent les cultures entraînant de pertes économiques pour les producteurs. Pour contrer ou réduire les dommages causés par les ravageurs, diverses stratégies sont



mises en œuvre, telles que l'utilisation de pesticides ou de prédateurs dans les écosystèmes agricoles. Bien que ces mesures de lutte sont efficaces dans de nombreux cas, les ravageurs peuvent développer des résistances, limitant ainsi l'efficacité de ses méthodes de lutte [63–65]. La plupart des études sur la résistance aux insecticides portent sur le développement de résistance dite physiologique [66–68]. Ce type de résistance est souvent lié des processus de détoxification des composantes des insecticides par la modification de la structure ou de la fonction des protéines avec un point de vue monogénétique sur l'évolution des résistances [65,67]. Cependant, la résistance aux insecticides peut également résulter de changement de plus qu'un gène. Ce point de vue polygénique permet de mettre en avant l'interaction entre les gènes ou encore l'effet additive de l'ensemble des loci du génome dans l'expression de caractère continus [58] associée au développement de résistance. Dans le cas de la détoxification, l'aspect polygénique de la résistance physiologique peut être traduit en un gradient de résistance comme caractère continu. Pour étudier l'aspect polygénique de la résistance des ravageurs, une approche génétique quantitative est plus appropriée car celle-ci se base sur l'estimation de la variance additive génétique, ou la variation de l'ensemble des loci du génome associée à une caractère [69,70].

En outre la résistance physiologique, les ravageurs peuvent modifier et adapter leur comportement afin de réduire leur exposition aux composants toxiques ou aux agents de lutte biologique [71,72]. Le comportement d'évitement est le principal comportement étudié menant à une résistance comportementale [72]. Par exemple, certains ravageurs évitent de se nourrir de ressources traitées avec des insecticides [73–76], éviter de pondre dans les sites traités avec des insecticides [77–80] ou simplement éviter tout contact avec la zone traitée avec des insecticides [81–83]. Le comportement d'évitement des insecticides peut entraîner des changements dans les choix et les préférences des ravageurs. Cependant, il est essentiel pour un individu d'explorer son environnement pour faire des choix entre les ressources ou des parcelles à exploiter [84]. Étonnamment, à notre connaissance, le comportement exploratoire n'a été que peu étudié ou abordé dans l'étude de la résistance comportementale, malgré son importance fondamentale et sa position centrale dans la littérature sur le comportement animal [85,86]. En tant que caractère polygénique, le comportement exploratoire s'est avéré être un caractère héréditaire [87] et soumis à la sélection de sélection [88].

La méthode conventionnelle pour étudier le comportement exploratoire en laboratoire consiste à enregistrer de façon standardisé un seul individu dans une arène vide de type « *open field* » [86,89]. Dans ce type de tests, diverses mesures comportementales peuvent être extraites [84], cependant la principale mesure utilisée est la distance totale parcourue. Récemment, une nouvelle mesure a été élaborée pour intégrer la relation entre la distance parcourue et l'aire explorée, comme mesure plus réaliste du comportement d'exploration [90]. Ainsi, cette nouvelle mesure appelée la couverture relative permet de mieux étudier le comportement d'exploration en corrigeant pour les individus stressés qui parcouru de longue distance mais couvre que peu d'aire de l'arène [90].

De plus, des caractères tels que les comportements exploratoires n'évoluent pas seuls, mais partagent une base génétique en commun avec d'autres caractères [17,58,91]. Ainsi, il n'est pas rare qu'un changement évolutif du comportement affecte un autre caractère et vice-versa. Ainsi comprendre et étudier les associations génétiques entre les caractères est importante pour mieux comprendre l'évolution dans son ensemble. Ces associations génétiques ou base génétique commune sont souvent dues à la pléiotropie (gènes exprimant différents traits) ou au déséquilibre de liaison (localisation proche de différents gènes qui sont transférés en même temps); et peuvent être identifiés comme la covariance ou corrélations génétiques. Pour évaluer la covariance génétique, il faut estimer la matrice de (co)variance génétique additive entre les caractères, également appelée matrice **G**, en utilisant une approche multivariée [17].

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} V_{a-1} & cov_{a(1-2)} \\ cov_{a(2-1)} & V_{a-2} \end{bmatrix}$$

Un des caractères potentiels impliqués dans l'évolution du comportement exploratoire qui peut être associé à la résistance des ravageurs pourrait être la masse corporelle. En effet, la masse corporelle peut être modifiée par la présence d'insecticides comme montré dans des expériences évolutives [92]. Il a également été démontré qu'elle covarie avec le comportement dans une certaine mesure [93–96]. Ce qui



fait de la masse corporelle un trait important à étudier dans notre compréhension de l'évolution des comportements d'exploration et de la résistance comportementale.

En plus de la corrélation génétique entre le comportement exploratoire et la masse corporelle, un autre type de corrélation génétique peut également interférer avec l'évolution du comportement. Nous supposons souvent que les populations sont homogènes, mais des sous-groupes peuvent y être présentés, tels les femelles et les mâles. Il est intéressant de noter que les femelles et les mâles répondent souvent différemment à la sélection même s'ils partagent une proportion importante de leur génome [97,98]. Cette variance génétique partagée, connue sous le nom de corrélation génétique entre les sexes (ou r_{fm}) [98,99], peut limiter l'évolution des femelles et/ou des mâles, et potentiellement mener à un conflit sexuel [97,100–102]. Pour incorporer la différence entre les sexes ainsi que sa r_{fm} , la matrice \mathbf{G} peut être étendue à une matrice \mathbf{G}_{fm} spécifique au sexe [98].

$$\mathbf{G}_{fm} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_f & \mathbf{B}^{-1} \\ \mathbf{B} & \mathbf{G}_m \end{bmatrix}$$

\mathbf{G}_{fm} expose la matrice \mathbf{G} des femelles (\mathbf{G}_f) avec sa propre covariance génétique entre le comportement exploratoire et la masse corporelle ; ainsi que la matrice \mathbf{G} des mâles (\mathbf{G}_m) et la matrice \mathbf{G} entre sexe (matrice \mathbf{B}). La matrice \mathbf{B} contient les corrélations génétiques entre les sexes (r_{fm}) pour chaque caractère dans sa diagonale ainsi que les corrélations génétiques possibles entre les traits croisés et les sexes dans le reste de la matrice (off-diagonale). La corrélation génétique entre les sexes (r_{fm}) a été estimée chez plusieurs espèces d'insectes pour des traits morphologiques ou physiologiques [95,103–107] mais rarement pour le comportement [108–110] et encore plus rarement au sein d'une matrice \mathbf{B} complète utilisant des modèles multivariés.

Dans cette étude, nous concentrons notre attention sur l'insecte ravageur *Lygus lineolaris* (Palisot de Beauvois) (Hemiptera : Miridae). *Lygus lineolaris* est un important ravageur en Amérique du Nord, du Canada au Mexique [13]. En tant que ravageur polyphage, il se nourrit de multiples plantes hôtes [22], causant des dommages économiques importants pour plusieurs productions telles que le coton aux États-Unis ou les petits fruits comme la fraise au Québec [4,13,23]. En tant qu'organisme nuisible, les producteurs utilisent les insecticides pour réguler leurs populations [111], mais aussi des prédateurs [30,31] ou des parasitoïdes [112,113]. Sans surprise, *L. lineolaris* a développé une résistance aux insecticides dans certains champs [111,114–116]. Les adultes ont même montré un comportement d'évitement dans leur préférence alimentaire [73,82]. L'objectif de cette étude est d'estimer la variance et covariance génétique de la masse corporelle et du comportement exploratoire de *L. lineolaris* avec les deux mesures de comportement : la distance totale et la couverture relative, à l'aide d'une étude génétique quantitative avec des croisements paternel de demi-fratrie (« paternal half-sibling breeding design » en anglais) [70]. En outre, nous examinons plus en détail la matrice génétique \mathbf{G} mais aussi celle entre les sexes \mathbf{G}_{fm} pour mieux comprendre les possibles contraintes génétiques de la masse et du comportement d'exploration dans l'établissement de résistance comportementale chez ce ravageur.

Matériel et méthodes

Population de *Lygus lineolaris*.

Au cours de l'été 2021, nous avons capturé des adultes et des larves de la punaise terne *Lygus lineolaris* sur six sites dans les Laurentides (Québec) (Figure S1). Les insectes ont été collectés dans des champs de fraises, des bandes pièges et la végétation sauvage en bordure du champ. Pour améliorer notre compréhension de la population sauvage, nous avons collecté les insectes au début de juillet (associés à la « période tôt » de l'été) et au mi-septembre (associés à la « période tardive » de l'été). Ces deux périodes correspondent à l'émergence de la seconde génération (« tôt ») et à la préparation à la période de diapause hivernale (« tard »). Dans trois sites, des punaises prédatrices *Nabis americoferus* (Carayon) (Hemiptera : Nabidae) a été introduites dans le cadre d'un autre projet portant sur le potentiel de ce prédateur en lutte biologique contre la punaise terne.

Les individus capturés à chaque site et durant la même période ont été maintenu dans des cages ensemble. Ainsi, nous avons maintenu douze populations. Nous avons également conservé une 13^{ième} population de



laboratoire, établie en 2020. Nous avons conservé les adultes et les larves dans un pot en plastique cylindrique modifié (950 ml, Elfe Plastik Inc.) avec un morceau de papier et de laitue comme refuge et substrat d'alimentation et de ponte. Les pots ont été conservés dans des tentes hydroponiques (SunStream) à température constante ($\sim 22 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$) et à l'humidité relative ($\sim 40 \% \pm 20 \%$) sous une photopériode de 16 :8. Trois fois par semaine, nous avons remplacé la laitue dans chaque pot, qui est à la fois une ressource alimentaire pour la punaise mais aussi un site de ponte. La laitue exploitée par l'adulte reproducteur est extraite et placée dans un nouveau pot pour générer la prochaine génération d'individu. Le temps de génération de cette espèce est d'environ un mois.

Après au moins deux générations au sein du laboratoire, les adultes nouvellement émergés ont été phénotypés pour le sexe dans les 5 jours après émergence et séparés par le sexe pour assurer leur statut vierge. Les individus vierges ont été utilisés pour établir le pedigree [70].

Création du pedigree de croisements paternel de demi-fratrie

Au sein de chaque population, nous avons placé un mâle vierge et une femelle vierge dans un pot en plastique carré (200 ml, Plastico) avec du papier et de la laitue pendant sept jours. Après la période d'accouplement, nous avons placé la laitue et la femelle dans un nouveau pot en plastique carré (500 ml, Uline) pendant deux jours pour permettre à la femelle de ponte plus longtemps. Les mâles sont restés dans le pot d'accouplement pour se reposer pendant plusieurs jours avant d'être jumelés avec une nouvelle femelle vierge de la même population. Les mâles ont été autorisés à s'accoupler avec trois à six femelles, mais certains accouplements entraînent une reproduction infructueuse (1,46 femelles accouplée par mâle). Au total, nous avons produit 305 familles. Pour chaque famille, nous avons phénotypé au hasard trois descendants femelles et trois descendants mâles pour leur comportement exploratoire et leur masse corporelle sur 64 blocs de mesure différents (voir ci-dessous). Tous les pots pour l'expérience de génétique quantitative ont été logés dans une tente hydroponique avec les mêmes paramètres que les populations de laboratoire.

Mesures comportementales et de masse corporelle

Au sein de chaque bloc de mesure, la progéniture collectée et phénotypée est isolée au sein d'un petit pot (90 ml, Teun) avec un morceau de papier et de la laitue. L'âge des individus a été normalisé à 4 à 5 jours après l'émergence en adulte ; cependant, certains individus ont été phénotypés plus tôt ou plus tard en raison de problèmes logistiques (46 individus de moins de 4 jours et 68 individus de plus de 8 jours). Pour mesurer le comportement d'exploration, nous avons placé individuellement chaque individu dans une arène carrée vide (*openfield*) dans une petite tente hydroponique avec les mêmes conditions que la population principale. Nous avons enregistré les mouvements avec une webcam pendant 10 minutes et ceux-ci sont par la suite encodés en coordonnées pour suivre l'ensemble de mouvement à l'aide de la bibliothèque R « trackR » (<https://swarm-lab.github.io/trackR/>) [117]. À partir des données de suivi, nous avons extrait la distance totale parcourue comme première mesure du comportement d'exploration et la couverture relative comme deuxième mesure du comportement d'exploration [128] (texte supplémentaire, figure S2). Après la mesure comportementale, nous avons anesthésié les individus avec du CO_2 et les avons pesés deux fois à l'aide d'une microbalance (Toledo). La valeur moyenne de ses deux mesures représente la masse corporelle humide individuelle. Nous avons phénotypé un total de 1148 individus de 305 familles à travers 64 blocs de mesure. Un individu était absent de la mesure comportementale, tandis que 23 individus étaient absentes pour la mesure de masse en raison de problèmes de manipulation.

Analyses statistiques

Au préalable, la distance totale parcourue a été log-transformée pour la rendre gaussienne. Toutes les variables continues, comme les variables réponses (masse corporelle humide, logarithme de la distance parcourue, couverture relative), ont été standardisées pour une moyenne de 0 et un écart type de 1, ainsi que les variables explicatives (âge de l'individu ; temps, température, humidité relative de la mesure comportementale). Nous avons aussi centré le sexe pour ajuster son interprétation comme effet moyen



lorsqu'il est utilisé dans les interactions [118]. De plus, la période de capture (tôt, tardive et aucune pour la population de laboratoire) a été transformée en une variable de contraste (précoce (-1), aucune (0), tardive (+1)) ainsi que la présence supplémentaire de *Nabis* (aucun ajout (-1), laboratoire (0), ajouté (+1)) pour mieux interpréter la différence entre les différents niveaux de ces facteurs.

Pour estimer la variance génétique additive et les covariances du comportement exploratoire et de la masse corporelle, nous avons réalisé un modèle mixte multivarié animal avec la masse corporelle, le log (distance parcourue) et la couverture relative comme variables réponses. Nous avons inclus le sexe, l'âge (premier et deuxième ordre) et leur interaction, si la population a été établie à partir de nos sites ou en 2020 (variable binaire : champ ou laboratoire), le contraste de période de capture, ainsi que le contraste d'ajout de *prédateurs Nabis*. Pour la distance parcourue et la couverture relative, nous avons également inclus l'identité de l'arène (2 niveaux), la température, l'humidité relative et le temps de mesure (premier et deuxième ordres) et leurs interactions avec le sexe. Nous avons inclus comme effets aléatoires l'identité de l'individu associé au pedigree, l'identité de la mère, le bloc de mesure (64 niveaux) et le site de collecte (7 niveaux) en tant qu'effets aléatoires. Pour tenir compte d'une éventuelle autocorrélation spatiale entre les sites, nous avons associé à effet aléatoire du site l'inverse de la matrice de distance (avec une distance de 100 entre la population de laboratoire établie de 2020 et tout site de capture).

Le modèle mixte multivarié animal a utilisé quatre chaînes de calcul avec 25 000 itérations avec une période de coupure de 5000 et un intervalle d'échantillonnage de 80. Nous avons utilisé un *prior* non informatifs [119] pour les effets d'ordonnée à l'origine et les effets fixes avec une distribution normale avec une moyenne de 0 et un écart-type de 2; pour les effets aléatoires, une distribution normale avec une moyenne de 0 et un écart type de 1. Cependant pour la variance additive génétique, en raison de sa faible variation, le prior a été spécifié comme distribution dite student avec un degré de liberté de 5, une moyenne de 5 et un écart type de 2.

Un second modèle mixte multivarié animal a été utilisé avec les mêmes spécificités de prior et structure d'effet fixe et aléatoire, mais nous avons divisé chaque effet aléatoire et sigma (résiduel) entre les sexes, permettant au modèle d'estimer les variances et covariance génétiques pour chaque sexe, en plus des covariances génétiques entre les sexes. Ce modèle a utilisé quatre chaînes de calcul avec 65 000 itérations avec une période de coupure de 5000 et un intervalle d'échantillonnage de 240. Tous les modèles ont été montés à l'aide du package *brms* [55] avec la version R 4.1.0 [54]. Avec une approche bayésienne, nous avons ainsi estimé l'intervalle de crédibilité ou l'IC similaire à l'intervalle de confiance autour de chaque estimation de variance et covariance [161 162].

Résultats

Comportement exploratoire et masse corporelle : source de variation

Sans surprise, les punaises terne femelles sont plus lourdes que les mâles (tableau 1 A, sexe : -0,731 [-0,822, -0,634]). Aucun effet de l'âge ni de la période n'est détecté sur la masse corporelle, mais les sexes diffèrent dans la façon dont la masse corporelle change selon les âges (tableau 1 A, sexe x âge : -0,198 [-0,361, -0,044]).

Les deux mesures du comportement exploratoire (distance totale (Tableau 1B) et couverture relative (Tableau 1C) ne diffèrent pas selon le sexe, ni l'âge ou la période. Cependant, la distance totale varie à travers le temps de la mesure (temps : 0,159 [0,077, 0,242]; temps²: -0,114 [-0,167, -0,063]) avec des individus qui parcouru plus de distance au cours de la journée est moins au début et à la fin de journée.



Tableau 1. Source de variance de A) la masse corporelle humide, et des deux mesures du comportement d'exploration (B) distance parcourue et C) couverture relative). Les valeurs en gras représentent un effet significatif avec leur intervalle de crédibilité supérieur (Up) et inférieur (Low) qui ne chevauche pas zéro. L'acronyme « Est. » représente l'estimation.

	A) Masse corporelle			B) Distance parcourue			C) Couverture relative		
	Est.	CI Low	CI Up	Est.	CI Low	CI Up	Est.	CI Low	CI Up
Intercept	0.018	-0.131	0.151	0.217	0.018	0.403	0.002	-0.149	0.152
Sexe	-0.731	-0.822	-0.634	-0.013	-0.164	0.124	0.097	-0.061	0.253
Age	0.086	-0.048	0.216	0.002	-0.121	0.127	0.014	-0.107	0.136
Age ²	-0.01	-0.032	0.013	-0.008	-0.03	0.013	0.001	-0.021	0.023
Time				0.159	0.077	0.242	0.069	-0.009	0.149
Time ²				-0.114	-0.167	-0.063	-0.047	-0.098	0.005
Période	0.048	-0.056	0.169	-0.016	-0.116	0.079	0.064	-0.022	0.147
Origin (lab)	0.274	-0.041	0.581	0.002	-0.547	0.52	-0.083	-0.343	0.154
Nabis	0.09	-0.043	0.218	-0.013	-0.152	0.112	-0.047	-0.149	0.072
OP ID (2)				-0.189	-0.298	-0.085	0.055	-0.062	0.171
Température				-0.006	-0.082	0.069	0.066	-0.008	0.145
Humidité				-0.051	-0.14	0.041	-0.08	-0.174	0.013
Sexe x Age	-0.198	-0.361	-0.044	0.079	-0.089	0.248	0.063	-0.12	0.251
Sexe x Age ²	0.047	0.016	0.074	-0.018	-0.05	0.016	-0.014	-0.049	0.023
Sexe x Time				0.005	-0.128	0.136	0.047	-0.086	0.181
Sexe x Time ²				-0.015	-0.118	0.084	-0.026	-0.126	0.066

Matrice génétique entre la masse corporelle et le comportement d'exploratoire (G)

Au niveau de la population, nous détectons de faible estimation de la variance génétique additive pour la masse corporelle et les deux mesures du comportement exploratoire, de même pour la variance entre les mères, les blocs d'expérience et les sites de collecte (tableau S1). Les scores d'héritabilité (h^2) sont par conséquent faible (tableau 2) avec une large incertitude mais ne chevauchant pas zéro.

Malgré la faible variance génétique, il est toujours possible d'estimer les différentes covariances et corrélations génétiques mais avec une incertitude élargie. Nous observons un point d'estimation positive pour des corrélations génétiques entre la masse et les mesures de comportement d'exploration positive avec cependant une large incertitude (tableau 3). Sans surprise, les deux mesures de comportement d'exploration ne covarient pas entre elles avec un point d'estimation proche de zéro, car la couverture relative est corrigée pour la distance parcourue (tableau 3).



Tableau 2. Estimations de l'héritabilité (h^2) de la masse corporelle et des deux mesures de comportement d'exploration (distance totale parcourue et couverture relative) pour la population globale et chaque sexe. CI représente l'intervalle de crédibilité supérieur (Up) et inférieur (Low) de chaque estimation d'héritabilité.

Caractère	Population	Héritabilité (h^2)		
		Estimation	CI Low	CI Up
Masse	Globale	0.157	0.001	0.522
	Femelle	0.087	>0.00001	0.378
	Male	0.082	>0.00001	0.342
Distance	Globale	0.071	>0.00001	0.227
	Femelle	0.045	>0.00001	0.155
	Male	0.072	>0.00001	0.293
Couverture	Globale	0.018	>0.00001	0.083
	Femelle	0.041	>0.00001	0.163
	Male	0.029	>0.00001	0.126

Tableau 3. Corrélations génétiques entre la masse corporelle, et les deux mesures de comportement d'exploration (distance totale parcourue et couverture relative) pour la population globale et chaque sexe. CI représente l'intervalle de crédibilité supérieur (Up) et inférieur (Low) de chaque estimation de corrélation. La deuxième partie du tableau présente les corrélations génétiques entre les sexes (r_{fm}) pour chaque caractère.

Corrélation génétiques	Population	Estimation	CI Low	CI Up
Masse x Distance	Globale	0.326	-0.393	0.834
	Femelle	0.155	-0.516	0.720
	Male	0.113	-0.501	0.632
Masse x Couverture	Global	0.159	-0.678	0.789
	Femelle	0.155	-0.513	0.701
	Male	-0.030	-0.600	0.548
Distance x Couverture	Global	0.021	-0.698	0.767
	Femelle	0.085	-0.599	0.679
	Male	-0.084	-0.648	0.577
r_{fm} Masse	Entre les sexes	0.154	-0.528	0.776
r_{fm} Distance	Entre les sexes	0.076	-0.621	0.678
r_{fm} Couverture	Entre les sexes	0.023	-0.563	0.652



Matrice génétique entre la masse corporelle et le comportement d'exploratoire spécifique entre les sexes (G_{fm})

En fragmentant de la matrice G en matrice G_{fm} , nous observons toujours de faible estimation de variance génétique et d'héritabilité (tableau 2 et tableau S1). Cependant les points d'estimation des corrélations génétiques semble différent entre les sexes entre la masse et la couverture relative, mais la large incertitude autour de ses estimations ne permet pas de confirmer leur différence (tableau 3).

Le matrice B nous révèle au sien de sa diagonale les corrélations génétiques entre les sexes (r_{fm}) pour chaque caractère, cependant encore une fois l'incertitude autour de ses points d'estimation sont large et chevauchent zéro. Pour la masse corporelle, le point d'estimation du r_{fm} est positive mais faible, tandis que ceux pour le comportement d'exploration sont proche de zéro (tableau 2). La plupart des corrélations génétiques entre les sexes et entre les caractères sont très faibles et proche de zéro (figure 1).

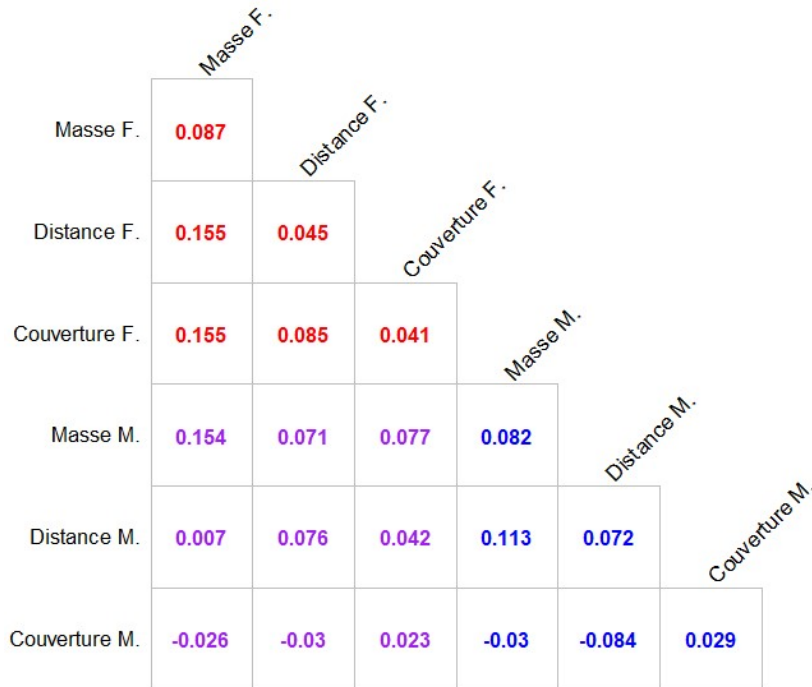


Figure 1. Diagramme de la matrice génétique de G_{fm} avec sur sa diagonale les points d'estimation de l'héritabilité (h^2) et sur le reste de la matrice les points d'estimation des corrélations génétiques. La matrice en rouge représente la matrice génétique G des femelles en rouge, celle des mâles en bleu et la matrice B en violet. L'acronyme « F. » correspond pour femelle, alors que celui de « M. » est pour mâles.

Discussion

Grace a cette étude de génétique quantitative, nous avons pu mettre en avant la présence de variation génétique (bien que faible) de la masse corporelle et du comportement d'exploration de la punaise terne. Par conséquent, une large incertitude est présente dans l'estimation des covariances et des corrélations génétiques. Malgré la grande incertitude, les points d'estimation des corrélations génétique sont positifs entre la masse et le comportement d'exploration au sein de la population étudiée mais aussi chez les femelles et mâles. De plus, les corrélations génétiques entre les sexes (r_{fm}) sont proches de zéro pour le comportement mais positif pour la masse.

Comportement d'exploratoire : deux mesures

Les deux mesures du comportement d'exploration étaient la distance totale parcourue et la couverture relative. On peut s'attendre à ce que les corrélations génétiques entre deux comportements distincts ou au sein d'une même mesure de comportement soit associés positivement comme prédit par les syndromes comportements [122,123]. Cependant, il n'est pas surprenant dans notre cas que la corrélation génétique



entre les deux mesure de comportement d'exploration soit nulle car la création de la couverture relative est conditionnée en fonction de la distance parcourue [90].

De plus, la variance génétique associée à la couverture relative est plus faible que celle de la distance parcourue, cela peut être due à l'utilisation des résidus d'un modèle GAM (texte supplémentaire, figure S2) dans la création de la couverture relative. Il est connu que l'utilisation des résidus d'un modèle pour créer une nouvelle variable réduit la variance initiale de celle-ci, ce phénomène est appelé « statistique sur statistiques ». Malgré la nouveauté de cette mesure et ses problèmes statistiques, nous observons la présence d'une variance génétique. À date, la seule variance génétique connue de la couverture relative est chez le guppy avec une héritabilité de $0,13 \pm 0,04$ qui est conventionnelle pour un trait comportemental [124]. Dans notre étude, l'observation d'une variance génétique ou héritabilité aussi faible est peu conventionnelle mais n'est pas surprenant pour un comportement animal [125]. Le comportement est un caractère dit labile qui varie énormément en fonction de l'environnement et au cours de la vie d'un individu, et il est souvent associé à des faibles scores de répétabilité et donc aussi d'héritabilité [125–127].

En plus d'une variation génétique réduite pour la couverture relative, nous observons des différences au niveau populationnelle entre les deux mesures comportementales. La distance totale parcourue variait au cours de la journée, avec un pic de distance vers midi (tableau 1), ce qui correspond à un effet circadien sur le comportement, ce qui n'est pas le cas pour la couverture relative. Ce résultat sur la distance parcourue contredit les observations faites sur la punaise terne démontrant aucun effet du cycle circadien sur la distribution des punaises dans les champs comme un proxy de leur dispersion et mobilité dans les champs [42]. D'autres recherches sont nécessaires pour mieux comprendre et valider la mesure de couverture relative comme comportement d'exploration, en plus de valider que les mesures de comportement d'exploration standardisées en laboratoire reflètent celle dans les champs.

Matrice génétique entre le comportement exploratoire et la masse corporelle

La faible variance génétique de la masse corporelle et du comportement d'exploration reflète le fait que ces caractères ont une capacité limitée pour réagir à la sélection [132]. La réponse à la sélection de ces caractères sera réduite et prendra plus de temps pour modifier ces caractères. Ainsi l'apparition de résistance comportementale dans ces populations de ravageur devront être lente à s'établir, si les méthodes de lutte ciblent le comportement d'exploration ou la masse corporelle. Cependant si les méthodes de lutte imposent des puissants agents de sélection, il est tout à fait possible que la réponse à la sélection de ces caractères soit plus accélérée malgré la faible capacité de réaction de ces caractères, mais nous sommes limités dans notre compréhension et estimation des pressions de sélection induites par les méthodes de lutte en champs chez cette espèce de ravageur. D'avantage de recherche devrait être menées pour estimer ses pressions de sélection et ainsi mieux comprendre l'évolution d'une résistance comportementale malgré le faible potentiel évolutif observée.

Deux possibles scénarios peuvent être envisager pour expliquer la présence d'une si faible variance génétique dans le comportement ou la masse corporelle. Il est possible qu'un fort taux de consanguinité ait été imposée dans nos populations maintenues en laboratoire. Cette consanguinité va alors agir comme un goulot d'étranglement et réduire la variance génétique observée. Cependant ce scénario est peu probable puisque nous avons collecté les punaises sur le terrain et commencé l'expérience après seulement deux générations en laboratoire. De plus, si la variance du comportement se réduisant à travers les différentes générations, la variance associée au différent bloc de mesure serait plus importante, ce qui n'est pas le cas (tableau S2). En outre, il est aussi possible que la faible variance génétique soit le résultat d'une forte pression de sélection passée qui a déjà érodé la variance génétique. Ainsi la population de punaise échantillonnée serait déjà à leur optimum de fitness [58 165 166]. Cependant, ce scénario est également peu probable parce que l'unique étude sur la génétique des populations de la punaise terne a montré que les populations de punaise n'étaient pas à l'équilibre et que les échanges génétiques sont potentiellement fréquents entre les différentes populations [134].

Malgré la faible variance génétique sur le comportement, il est possible d'estimer les corrélations génétiques entre ces caractères avec de très large incertitude. Cependant les points d'estimation peuvent nous indiquer d'une certaine manière la force et la direction des associations génétiques entre les caractères, malgré leur importante incertitude. Ainsi l'association génétique entre la masse corporelle et



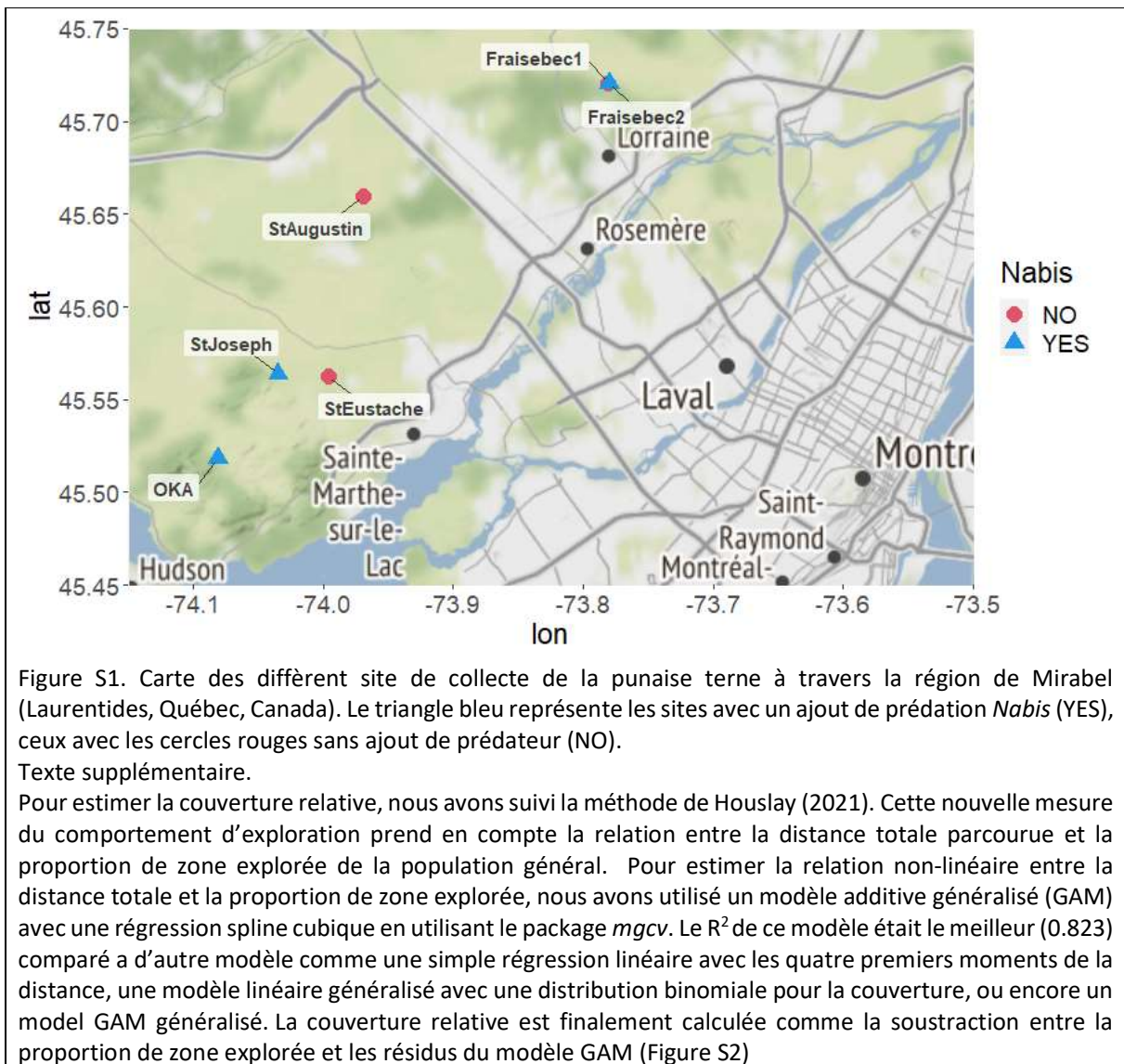
le comportement d'exploration est positive. Une association positive entre des caractères démontre que si un trait est sélectionné et répond à cette sélection, l'autre caractère aura par conséquent lui va répondre à cette sélection de façon indirecte et vice-versa [17]. Un scénario intéressant est présent si les deux caractères sont sélectionnés, si leurs sélections sont dans la même direction, les traits vont évoluer plus vite ; alors que si leurs sélections sont une direction opposée, cela va ralentir voire possiblement annuler l'évolution des deux caractères [17]. En général, la corrélation génétique entre la masse corporelle et le comportement varie entre les études avec une corrélation génétique positive chez le grillon [93] ou faible et proche de zéro chez la mouche [95]. Pour la punaise terne, l'apparition de résistance comportementale avec un changement du comportement d'exploration aura alors pour conséquence un changement aussi de leur masse corporelle. Un des risques est qu'une augmentation de leur masse doit aussi s'accompagner par une augmentation de la prise alimentaire et par conséquent une possible augmentation de dommages dans les champs.

Matrice génétique entre le comportement exploratoire et la masse corporelle entre les sexes

La matrice **B** donne un aperçu de la mesure dans laquelle la variance génétique est partagée entre les femelles et les mâles, à la fois au sein et entre les caractères. Seules quelques études ont estimé la corrélation génétique entre les sexes (r_{fm}) pour le comportement (activité ou exploration) avec r_{fm} signalé comme positif chez le grillon [93,108,110], faible proche de zéro chez l'araignée [135] ou dans le coléoptère [136] et des résultats mitigés pour les mouches [95,109]. Pour cette étude, le r_{fm} sur le comportement exploratoire était nul (proche de zéro) dans les deux mesures et positif mais faible pour la masse corporelle, reflétant la dissociation génétique entre les sexes pour ces caractères. Si les sexes diffèrent dans leur sélection, ce manque de variance partagée leur permettra de pouvoir évoluer de façon indépendante [139-141], produisant généralement un dimorphisme sexuel sur ces caractères [141-143]. En général, les r_{fm} sont négativement corrélées avec le dimorphisme sexuel [99,137], un faible r_{fm} est associé avec un fort dimorphisme. Dans notre étude, c'est le cas pour la masse corporelle mais pas pour le comportement. Il est possible que cette association entre le r_{fm} et le dimorphisme sexuel soit plus variable que prévu et que d'autres mécanismes évolutifs comme la dominance des gènes ou la plasticité phénotypique puissent obscurcir le dimorphisme du comportement absent dans notre étude.

Pour conclure, nos résultats démontrent que la punaise terne a un faible potentiel évolutif dans son comportement d'exploration et donc devrait modifier leur comportement d'exploration lentement. Ainsi une résistance comportementale basée sur un changement de la mobilité associée à l'exploration devrait émerger lentement. De plus, une modification du comportement d'exploration devrait s'accompagner d'une modification de la masse corporelle et possiblement d'un changement de leur prise alimentaire et de dommages dans les champs. Du fait de la dissociation génétique entre les sexes, il est possible que chaque sexe développe des résistances comportementales différentes. Ce résultat -si confirmé en étudiant la réponse de chaque sexe aux méthodes de lutte - complexifierait la lutte contre ce ravageur et les producteurs devront alors établir des stratégies spécifiques pour chaque sexe.

Information supplémentaire – Matrice de (co)variance génétique du comportement exploratoire et de la masse corporelle chez une espèce d'insecte nuisible *Lygus lineolaris*.



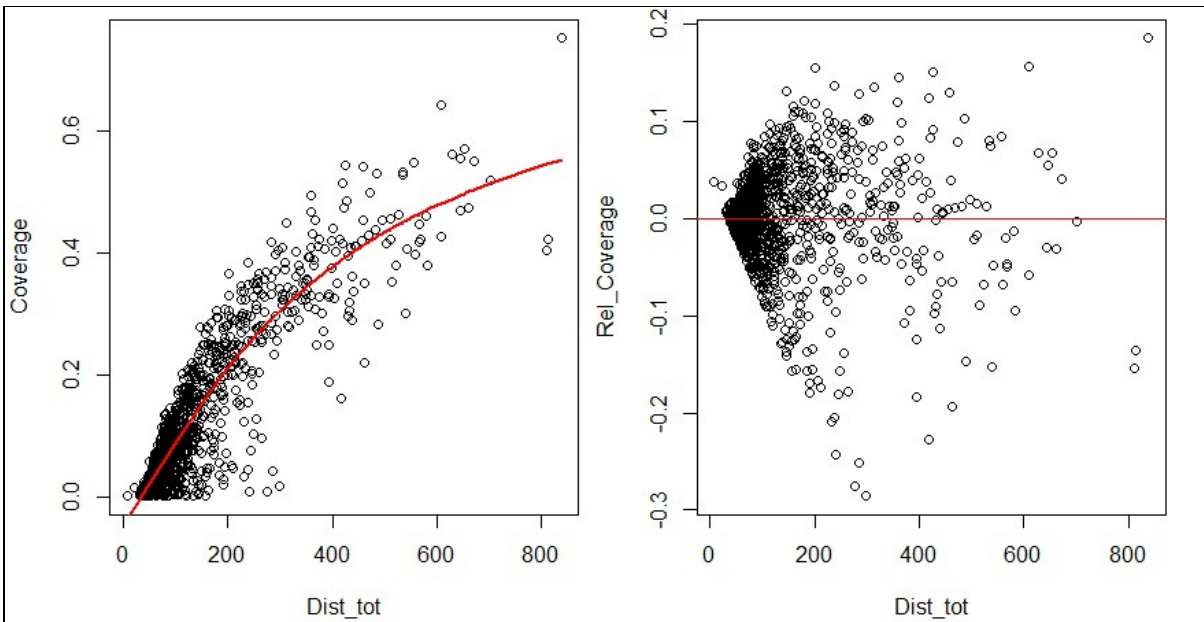


Figure S2. Relation entre la distance totale parcourue (Dist_tot) et la proportion de zone explorée (Coverage). La ligne rouge représente la régression du modèle GAM (modèle additive généralisée) suivant une régression dite spline cubique. Les résidus de ce modèle sont extraits et soustrait à la proportion de zone explorée pour produire la couverture relative (Rel_Coverage) présenté dans le panel de droite.

Tableau S1. Estimation des différentes variances avec leur intervalle de crédibilité (CI) supérieur (Up) et inférieur (Low) de la masse corporelle et des deux mesures de comportement d’exploration (distance totale parcourue et couverture relative) pour la population globale et pour chaque sexe. L’acronyme « Est. » représente l’estimation.

Caractère	Population	Variance génétique			Variance Mère			Variance Block			Variance Site			Variance Résiduelle			
		Est.	CI Low	CI Up	Est.	CI Low	CI Up	Est.	CI Low	CI Up	Est.	CI Low	CI Up	Est.	CI Low	CI Up	
Masse	Global	0.14	>0.0001	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.35	0.60
		0.11		0.42	0.16	0.12	0.27	0.07	0.04	0.17	0.00	0.07	0.03	0.51	0.44	0.11	
	Femelle	0.13	>0.0001	0.57	0.30	0.00	0.49	0.10	0.00	0.27	0.02	0.00	0.13	0.79	0.60	0.80	
Distance	Global	0.07	>0.0001	0.23	0.05	0.00	0.03	0.00	0.00	0.08	0.04	0.00	0.24	0.82	0.70	0.90	
		0.02		0.04	0.02	0.00	0.13	0.03	0.01	0.05	0.06	0.01	0.02	0.06	0.08	0.28	
	Femelle	0.05	>0.0001	0.19	0.02	0.00	0.09	0.04	0.00	0.12	0.05	0.00	0.23	0.90	0.80	0.90	
	Male	0.09	>0.0001	0.40	0.23	0.00	0.38	0.03	0.11	0.06	0.00	0.31	0.82	0.70	0.90		
		0.02		0.09	0.04	0.64	0.38	0.09	0.05	0.07	0.01	0.02	0.08	0.11	0.09		



Couverture	0.018	>0.0001	0.081	0.010	0.000	0.047	0.059	0.022	0.011	0.006	0.000	0.002	0.090	0.827	0.987
Femelle	0.051	>0.0001	0.022	0.029	0.000	0.088	0.010	0.035	0.021	0.002	0.000	0.007	0.094	0.857	1.018
Male	0.029	>0.0001	0.012	0.002	0.000	0.087	0.034	0.001	0.009	0.002	0.000	0.008	0.092	0.853	0.987

Objectif C- Variation génétique de la zoophagie et dans la réponse à la disponibilité des ressources végétales chez la punaise phytozophages *Lygus lineolaris*.

François Dumont & Maud Lemay

Résumé

Les insectes phytozophages incluent des ressources animales dans leur alimentation composées généralement de ressources végétales. Dans une population, le régime alimentaire des individus varie en fonction de leurs préférences alimentaires. Ces préférences sont déterminées par l'environnement et la génétique des individus. Le degré de voracité pour les proies (zoophagie) est susceptible d'influencer les interactions écologiques des individus. Chez les ravageurs des cultures, ces interactions écologiques déterminent leur impact économique. Cette étude vise à mesurer la variation génétique de la zoophagie d'un ravageur phytozophage, la punaise terne *Lygus lineolaris* (Hemiptera : Miridae). Des œufs d'*Ephestia* (ressources animales) ont été offerts à des individus de 15 lignées isofemelles dans une expérience de laboratoire. Les individus avaient accès ou non à une ressources végétales alternatives. Les résultats indiquent que les punaises ternes consomment une quantité importante d'œufs d'*Ephestia* par jour et que ce comportement varie en fonction de la disponibilité d'une ressource végétale. La variation génétique en zoophagie est élevée avec une héritabilité de 0,27. De plus, les lignées très zoophages étaient moins sensibles à la disponibilité des ressources végétales que les lignées peu zoophages. Les résultats suggèrent que les individus au sein des populations de punaises ternes ont un certain niveau de spécialisation alimentaire. Cependant, le lien entre le succès biologique et la consommation de proies chez cet insectes phytozophages n'a pas encore été établi.

Introduction

Les insectes omnivores incluent à la fois des proies et des ressources végétales dans leur régime alimentaire [138]. L'omnivorie peut être opportuniste (c.-à-d. consommation de ressources en fonction de leur disponibilité) ou obligatoire (c.-à-d. que les proies et les ressources végétales sont nécessaires pour compléter le développement et la reproduction) [138]. Les omnivores opportunistes sont soit des herbivores qui se nourrissent de proies, soit des prédateurs qui se nourrissent de ressources végétales [138]. Ces omnivores peuvent être classés selon un continuum allant des espèces phytozophages aux espèces zoophytophages en fonction de l'importance relative des ressources végétales et des proies dans leur régime alimentaire [138]. Cependant, plusieurs espèces généralistes sont composées d'individus spécialisés dans des régimes particuliers [139–143]. Par conséquent, le régime alimentaire peut varier considérablement entre les individus d'une même espèce et d'une même population [143]. Cette spécialisation individuelle alimentaire peut modifier les processus écologiques au niveau de la communauté et de la population [140,144].



La spécialisation alimentaire individuelle est observée chez les prédateurs zoophytophages [143,145,146]. Au sein des populations de prédateurs zoophytophages *Campylomma verbasci* (Meyer-Dür) et *Nesidiosus tenuis* (Reuter) (Hémiptères : Miridae), les individus se sont spécialisés dans le régime alimentaire à base de proies ou de plantes [143,146]. De plus, la spécialisation alimentaire individuelle est partiellement déterminée par la génétique chez ces espèces. Par conséquent, dans la même population de prédateurs zoophytophages, les individus sont génétiquement disposés à être plus phytophages tandis que d'autres sont plus zoophages. La spécialisation alimentaire module les interactions prédateur-proie [144,145], le cannibalisme [147] et les interactions avec les plantes [146]. Pour ces insectes, les conséquences écologiques de la spécialisation alimentaire peuvent être économiquement pertinentes parce qu'ils sont des agents de lutte biologique utiles [142], mais peuvent aussi causer des dommages aux cultures [142,148]. Néanmoins, les conséquences écologiques et économiques de la spécialisation alimentaire chez les insectes phytozoophages restent inconnues.

Connu principalement pour être un ravageur de nombreuses cultures, la punaise terne (PT) *Lygus lineolaris* (Palisot de Beauvois) (Hemiptera : Miridae) consomme diverses proies, y compris les pucerons, les aleurodes et les œufs de lépidoptères [149–151]. Les *Lygus* ont des enzymes digestives associées à la consommation de proies (c.-à-d. les phospholipases) et de plantes (i.e., pectinases et amylases) [152,153] et une morphologie buccale d'omnivores [154]. Ils sont donc physiologiquement et morphologiquement prédisposés à être principalement phytophages et incluent de façon opportuniste des proies dans leur régime alimentaire [138]. Cependant, il est possible qu'un certain niveau de spécialisation alimentaire soit observable chez *Lygus*, comme c'est le cas pour d'autres espèces de Miridae (Dumont et al., 2017a). Les conséquences écologiques d'une spécialisation alimentaire chez la PT, qui est un ravageur majeur dans plusieurs cultures, entraîneraient des conséquences économiques dans les agroécosystèmes [142,155].

L'objectif de cette étude était de mesurer la variabilité génétique et l'héritabilité de la zoophagie et la spécialisation alimentaire chez la PT phytozoophage. La disponibilité des ressources végétales devrait diminuer le niveau moyen de zoophagie des PT. La réponse des PT à la disponibilité des ressources végétales devrait varier en fonction de leur génotype, ce qui indique une spécialisation alimentaire chez cet insecte ravageur omnivore.

Matériels et méthodes

L'expérience a été réalisée dans le laboratoire du Centre de recherche agroalimentaire de Mirabel (CRAM), Mirabel, Québec, Canada.

Lignées isofemelles et élevage

Une population source a été établie à partir de captures sur le terrain à divers endroits au Québec, en Ontario et en Alberta (Canada). Les individus ont été élevés en laboratoire sur de la laitue romaine et des œufs d'*Ephestia kuehniella* Zeller (Lepidoptera: Pyralidae). Au total, 15 lignées isofemelles ont été fondées chacune par un seul couple choisi au hasard dans la population d'élevage (environ 1000 individus). Les lignées isofemelles ont été conservées dans des cages de mousseline (30 x 30 x 30 cm). Les individus de la première à la 4^{ième} génération (environ 30 jours par génération) ont été testés pour leur niveau de zoophagie.

Niveau de zoophagie

Les punaises ternes adultes ont été gardées à jeun pendant 24 heures dans un SoloCup où seule de l'eau était fournie dans un Eppendorf avec du coton de dentiste. Après cette période, les punaises ternes pouvaient se nourrir d'une quantité *ad libitum* d'œufs d'*Ephestia* placés sur la surface collante d'un Post-it jaune (zone de 1 cm²). L'eau offerte dans l'Eppendorf a été préservée dans le SoloCup. Deux traitements ont été offerts aux PT soit avec ou sans morceau de salade romaine biologique (ressource végétale alternative). Après une période de 24 heures, la PT a été retirée et les œufs consommés ont été comptés. Un traitement témoin sans PT a également été effectué (n = 31). Le nombre d'œufs comptés comme



consommés dans le traitement témoin était de $1,25 (\pm 0.38 \text{ s.e.})$. Par conséquent, le nombre d'œufs consommés dans les traitements avec PT était en effet le résultat de la consommation d'œufs par les PT.

Analyse statistique

Un modèle généralisé linéaire mixte (GLMER) pour la distribution Poisson a été utilisé pour tester l'effet du traitement sur la consommation d'œufs d'*Ephestia* par les PT. Les lignées ont été incluses en tant qu'effet aléatoire et le traitement en tant que pente aléatoire. La signification statistique de la pente aléatoire a été déterminée en comparant deux modèles avec et sans pente aléatoire (test du rapport de vraisemblance).

Estimation de l'héritabilité

L'héritabilité au sens large (H^2) a été calculée directement sur le modèle GLMER à l'aide de la fonction *rptPoisson* la librairie *rptR* [156]. L'intervalle de confiance à 95 % a été estimée à l'aide d'une analyse *bootstraps* paramétrique avec 1000 permutations [157].

Toutes les analyses ont été exécutées dans R [54].

Résultats

La disponibilité des ressources végétales entraîne une diminution de la consommation de proies par les adultes PT ($\beta = 1,12 \pm 0,13$; $z = 8,93$; $p < 0,0001$) (Figure 1). En l'absence de ressources végétales, les adultes PT ont consommé en moyenne $103,2 (\pm 4,7 \text{ s.e.})$ œufs d'*Ephestia* en 24h. Cette moyenne tombe à $41,4 (\pm 3,7 \text{ s.e.})$ lorsque PT avait accès aux ressources végétales.

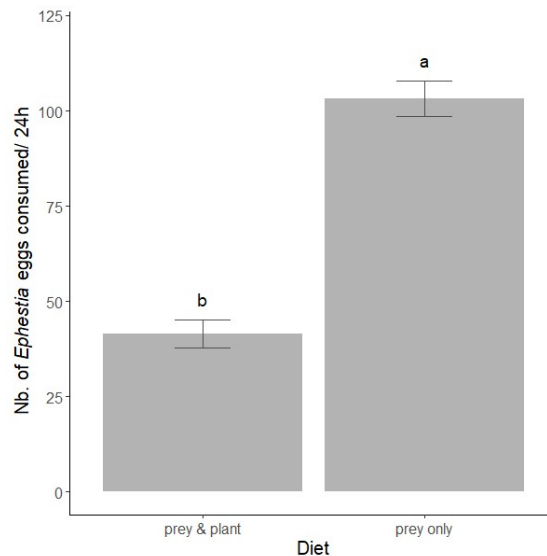


Figure 1 : Nombre moyen d'œufs d'*Ephestia* consommés en 24 h par des punaises ternes adultes lorsque les individus testés avaient accès à la fois à des proies et à du matériel végétal ou à des proies seulement. Les différentes lettres représentent des résultats statistiquement significatifs ($\alpha = 0,05$).

Les estimations de l'héritabilité (H^2) pour le niveau de zoophagie étaient de 0,27 (IC 95 % : [0,11 – 0,42]), que les ressources végétales soient disponibles ou non. L'intervalle de confiance excluant zéro indique que les lignées isofemelles diffèrent significativement dans leur niveau de zoophagie (Figure 2).

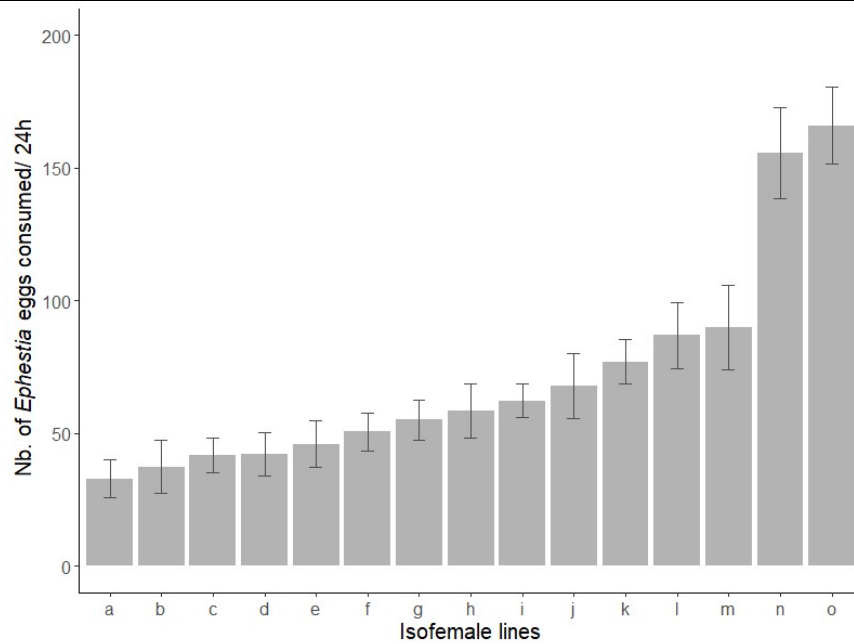


Figure 2 : Nombre moyen d'œufs d'*Ephestia* consommés en 24 h par des punaises ternes adultes de 15 lignées isofemelles, que les ressources végétales soient disponibles ou non.

La pente aléatoire était statistiquement significative ($LRT_1 = 5797,1$; $p < 0,0001$), ce qui indique que les lignées isofemelles diffèrent dans leur réponse à la disponibilité des ressources végétales (figure 3). La corrélation entre les interceptions aléatoires (lignées isofemelles) et les pentes aléatoires (traitement diète) était de $-0,83$. Par conséquent, le niveau de zoophagie des lignées isofemelles est négativement corrélé avec leur réactivité à la disponibilité des ressources végétales. Les lignées plus zoophages réagissent moins à la disponibilité des ressources végétales que les lignées moins zoophages (figure 4).

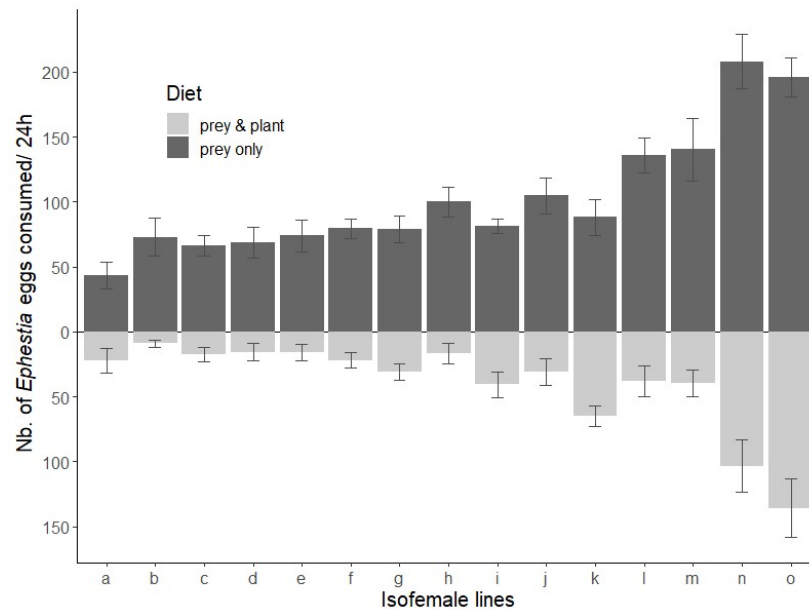


Figure 3 : Nombre moyen d'œufs d'*Ephestia* consommés en 24 h par des punaises ternes adultes de 15 lignées isofemelles sous deux traitements « diète » : proies et plantes (gris clair) et proies seulement (gris foncé).

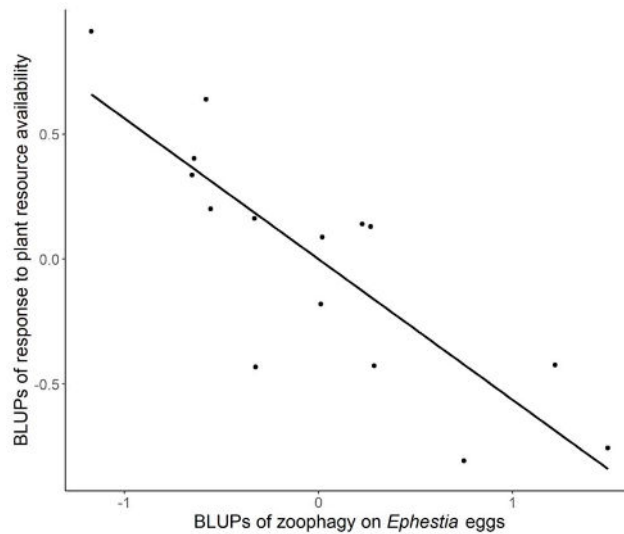


Figure 4 : Corrélation entre les meilleures prédictions linéaires sans biais (*BLUPs*) pour la zoophagie des lignées isofemelles et pour le niveau de réponse à la disponibilité des ressources végétales. Les deux *BLUPs* ont été extraits d'un modèle généralisé linéaire mixte (GLMER) avec des lignées isofemelles en effet aléatoire et un traitement « diète » (proie et plante vs proie seulement) en pente aléatoire. Chaque point représente une lignée isofemelle.

Discussion

La consommation de proies (zoophagie) chez les PT est rarement étudiée dans la littérature en raison de sa polyphagie élevée (exploitation d'une vaste gamme de plantes hôtes) et des dommages qu'elle cause aux cultures. Nos résultats indiquent que les proies peuvent être plus importantes que prévu dans le régime alimentaire des PT. Toutes les lignées isofemelles incluent des proies dans leur alimentation, que les ressources végétales soient disponibles ou non. Cependant, le niveau de zoophagie varie considérablement entre les lignées isofemelles. L'héritabilité de la zoophagie (H^2) de 0,27 était similaire à d'autres espèces de Miridae omnivores tels que *N. tenuis* [146], *C. verbasci* [145] et *Dicyphus hesperus* (Knight) (Hemiptera : Miridae) (F. Dumont, données non publiées). La PT a montré une plasticité phénotypique dans la réponse à la disponibilité des ressources végétales, réduisant la zoophagie lorsque les ressources végétales sont disponibles. Cependant, les lignées isofemelles diffèrent dans leur réponse à la disponibilité des ressources végétales. Les lignées peu zoophages compensent le manque de ressources végétales en augmentant la consommation de proies, mais passent à un régime principalement végétal lorsque ces ressources sont disponibles. En revanche, les lignées très zoophages maintiennent un niveau de zoophagie élevé, que les ressources végétales soient disponibles ou non. Par conséquent, un certain niveau de spécialisation alimentaire est observé chez les PT comme chez d'autres miridae omnivores [143,146].

Notre étude confirme que la consommation de proies est un aspect non négligeable de l'écologie des PT. Solà et al. [158] ont observé que l'inclusion de proies dans le régime alimentaire des PT améliore la survie et le développement larves. Il n'est donc pas surprenant que la PT ait conservé l'enzyme digestive liée à la zoophagie tout au long de son évolution [152]. La PT est probablement un prédateur opportuniste, incluant les proies à son alimentation lorsqu'elles sont disponibles, sans les pourchasser. Cependant, la spécialisation alimentaire observée dans notre expérience suggère que certains individus pourraient rechercher activement des proies. Cette partie de l'écologie de la PT dans des conditions naturelles est inconnue.



Les conditions écologiques (e.g., compétition intraspécifique, risque de prédation) peuvent entraîner une spécialisation alimentaire individuelle chez les espèces omnivores [140,142,143,159–161]. Chez les PT, leur diète est principalement composée de ressources végétales abondantes et pour lesquelles la compétition intraspécifique est faible [162]. Ainsi, la compétition intraspécifique est peu susceptible d’entraîner la spécialisation alimentaire. En revanche, la sensibilité au risque de prédation [161] et les bénéfices d’inclure des ressources animales dans la diète pourraient conjointement créer une variabilité des diètes dans les populations de PT. Par exemple, les individus très zoophages, qui pourraient choisir leurs plantes hôtes en fonction de la disponibilité des proies, seraient susceptibles de rencontrer d’autres prédateurs qui consomment aussi ces proies. Plusieurs prédateurs de punaises ternes consomment des pucerons et des œufs de Lépidoptères [27,163,164]. Ainsi, les punaises ternes très zoophages pourraient être davantage impliquées dans la prédation intraguilde que les individus peu zoophages. Dans ces interactions, elles sont susceptibles d’être davantage dans la position de proie intraguilde que de prédateur intraguilde. Donc, chez la PT, une spécialisation alimentaire sur une diète animale serait associée à des gains et des risques élevées, alors qu’une spécialisation sur une diète végétale est davantage une stratégie prudente (i.e., faible gain et faible risque). Le contexte écologique détermine quelle stratégie est plus avantageuse [141,165–167].

Nos résultats démontrent que la PT a un potentiel évolutif élevé en milieu agricole en réponse aux différentes méthodes de lutte. L’utilisation répétée des insecticides contre PT ou autres ravageurs devrait créer des conditions où les proies disponibles pour PT sont rares. Dans ces conditions, les PT spécialisée sur les ressources végétales pourraient performer davantage et accroître leur représentativité dans les populations. Si ces individus sont associés à plus de dommage aux cultures, les traitements insecticides sont donc susceptibles d’engendrer des populations de PT plus virulente. En revanche, la présence de prédateurs serait plus néfaste pour les PT spécialisées sur les ressources animales si cette stratégie est associée à une hausse du taux de rencontre entre PT et ses prédateurs. Ainsi, les PT spécialisées sur les ressources végétales pourraient être favorisé autant par les méthodes de lutte chimique que biologique. Cette hypothèse reste toutefois à être testée.

Livrables 2022-2023

- mise en place des dispositifs au champ- **réalisé**
- réalisation des essais au champ- **réalisé**
- développement des élevages en laboratoire pour voir l’évolution des populations- **réalisé**
- analyse des résultats- **réalisé**
- diffusion des résultats- **réalisé**
- quantification de l’apport des diverses caractéristiques sur les dommages aux fruits (volet champ) - **réalisé**
- caractérisation du potentiel évolutif des traits identifiés- **réalisé**

Références

1. Shackel, K.A.; de la Paz Celorio-Mancera, M.; Ahmadi, H.; Greve, L.C.; Teuber, L.R.; Backus, E.A.; Labavitch, J.M. Micro-Injection of Lygus Salivary Gland Proteins to Simulate Feeding Damage in Alfalfa and Cotton Flowers. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology: Published in Collaboration with the Entomological Society of America* **2005**, *58*, 69–83.
2. Wise, I.L.; Lamb, R.J. Economic Threshold for Plant Bugs, Lygus Spp.(Heteroptera: Miridae), in Canola. *The Canadian Entomologist* **1998**, *130*, 825–836.
3. Wise, I.L.; Tucker, J.R.; Lamb, R.J. Damage to Wheat Seeds Caused by a Plant Bug, Lygus Lineolaris L. *Canadian Journal of Plant Science* **2000**, *80*, 459–461.
4. Allen, W.W.; Gaede, S.E. The Relationship of Lygus Bugs and Thrips to Fruit Deformity in Strawberries. *Journal of Economic Entomology* **1963**, *56*, 823–825, doi:10.1093/jee/56.6.823.
5. Joseph, S.V.; Bolda, M. Efficacy of Insecticides against Lygus Hesperus Knight (Hemiptera: Miridae) in the California’s Central Coast Strawberry. *International Journal of Fruit Science* **2016**, *16*, 178–187.



6. Rosenheim, J.A. Control Failures Following Insecticide Applications in Commercial Agriculture: How Often Do They Occur? A Case Study of *Lygus hesperus* (Hemiptera: Miridae) Control in Cotton. *Journal of Economic Entomology* **2021**, *114*, 1415–1419.
7. Dorman, S.J.; Gross, A.D.; Musser, F.R.; Catchot, B.D.; Smith, R.H.; Reisig, D.D.; Reay-Jones, F.P.; Greene, J.K.; Roberts, P.M.; Taylor, S.V. Resistance Monitoring to Four Insecticides and Mechanisms of Resistance in *Lygus lineolaris* Palisot de Beauvois (Hemiptera: Miridae) Populations of Southeastern USA Cotton. *Pest Management Science* **2020**, *76*, 3935–3944, doi:10.1002/ps.5940.
8. Fleming, D.E.; Krishnan, N.; Catchot, A.L.; Musser, F.R. Susceptibility to Insecticides and Activities of Glutathione S-Transferase and Esterase in Populations of *Lygus lineolaris* (Hemiptera: Miridae) in Mississippi. *Pest Management Science* **2016**, *72*, 1595–1603.
9. Alfaro-Tapia, A.; Alvarez-Baca, J.K.; Fuentes-Contreras, E.; Figueroa, C.C. Biological Control May Fail on Pests Applied with High Doses of Insecticides: Effects of Sub-Lethal Concentrations of a Pyrethroid on the Host-Searching Behavior of the Aphid Parasitoid *Aphidius colemani* (Hymenoptera, Braconidae) on Aphid Pests. *Agriculture* **2021**, *11*, 539.
10. Palumbi, S.R. Humans as the World's Greatest Evolutionary Force. *Science* **2001**, *293*, 1786–1790.
11. Crozier, L.G.; Hendry, A.P.; Lawson, P.W.; Quinn, T.P.; Mantua, N.J.; Battin, J.; Shaw, R.G.; Huey, R.B. Potential Responses to Climate Change in Organisms with Complex Life Histories: Evolution and Plasticity in Pacific Salmon. *Evolutionary Applications* **2008**, *1*, 252–270.
12. Thrall, P.H.; Oakeshott, J.G.; Fitt, G.; Southerton, S.; Burdon, J.J.; Sheppard, A.; Russell, R.J.; Zalucki, M.; Heino, M.; Ford Denison, R. Evolution in Agriculture: The Application of Evolutionary Approaches to the Management of Biotic Interactions in Agro-Ecosystems. *Evolutionary Applications* **2011**, *4*, 200–215.
13. George, J.; Glover, J.P.; Gore, J.; Crow, W.D.; Reddy, G.V.P. Biology, Ecology, and Pest Management of the Tarnished Plant Bug, *Lygus lineolaris* (Palisot de Beauvois) in Southern Row Crops. *Insects* **2021**, *12*, 807, doi:10.3390/insects12090807.
14. Watson, G.B.; Siebert, M.W.; Wang, N.X.; Loso, M.R.; Sparks, T.C. Sulfoxaflor—A Sulfoximine Insecticide: Review and Analysis of Mode of Action, Resistance and Cross-Resistance. *Pesticide Biochemistry and Physiology* **2021**, *178*, 104924.
15. Zhu, Y.C.; West, S.; Snodgrass, G.; Luttrell, R. Variability in Resistance-Related Enzyme Activities in Field Populations of the Tarnished Plant Bug, *Lygus lineolaris*. *Pesticide Biochemistry and Physiology* **2011**, *99*, 265–273, doi:10.1016/j.pestbp.2011.01.005.
16. Snodgrass, G.L. Insecticide Resistance in Field Populations of the Tarnished Plant Bug (Heteroptera: Miridae) in Cotton in the Mississippi Delta. *Journal of Economic Entomology* **1996**, *89*, 783–790.
17. Lande, R.; Arnold, S.J. The Measurement of Selection on Correlated Characters. *Evolution* **1983**, *37*, 1210–1226.
18. Falconer, D.S.; Mackay, T.F.C. Introduction to Quantitative Genetics 4th Edition. *Harlow, UK: Longmans* **1996**.
19. Lynch, M.; Walsh, B. *Genetics and Analysis of Quantitative Traits*; Sinauer Sunderland, MA, 1998; Vol. 1.
20. Nakazato, B.M.; Macoris, M. de L. da G.; Urbinatti, P.R.; Lima-Camara, T.N. Locomotor Activity in *Aedes Aegypti* with Different Insecticide Resistance Profiles. *Revista de Saúde Pública* **2021**, *55*.
21. Sarfraz, M.; Dossall, L.M.; Keddie, B.A. Evidence for Behavioural Resistance by the Diamondback Moth, *Plutella xylostella* (L.). *Journal of Applied Entomology* **2005**, *129*, 340–341, doi:10.1111/j.1439-0418.2005.00969.x.
22. Young, O.P. Host Plants of the Tarnished Plant Bug, *Lygus lineolaris* (Heteroptera: Miridae). *Annals of the Entomological Society of America* **1986**, *79*, 747–762, doi:10.1093/aesa/79.4.747.
23. Tuelher, E.S.; Backus, E.A.; Cervantes, F.; Oliveira, E.E. Quantifying *Lygus lineolaris* Stylet Probing Behavior and Associated Damage to Cotton Leaf Terminals. *J Pest Sci* **2020**, *93*, 663–677, doi:10.1007/s10340-019-01184-8.
24. Lambert, L.; Laplante, G.; Carisse, O.; Vincent, C. Maladies, Ravageurs et Organismes Bénéfiques Du Fraisier, Du Framboisier et Du Bleuétier. *Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Ville de Québec, Québec, Canada* **2007**.



25. Dumont, F.; Provost, C. Combining the Use of Trap Crops and Insecticide Sprays to Control the Tarnished Plant Bug (Hemiptera: Miridae) in Strawberry (Rosaceae) Fields. *Can Entomol* **2019**, *151*, 251–259, doi:10.4039/tce.2019.7.
26. Dumont, F.; Provost, C. Using Autumnal Trap Crops to Manage Tarnished Plant Bugs (*Lygus Lineolaris*). *Insects* **2022**, *13*, 441.
27. Hagler, J.R.; Nieto, D.J.; Machtley, S.A.; Spurgeon, D.W.; Hogg, B.N.; Swezey, S.L. Dynamics of Predation on *Lygus Hesperus* (Hemiptera: Miridae) in Alfalfa Trap-Cropped Organic Strawberry. *Journal of Insect Science* **2018**, *18*, 12.
28. Swezey, S.L.; Nieto, D.J.; Hagler, J.R.; Pickett, C.H.; Bryer, J.A.; Machtley, S.A. Dispersion, Distribution, and Movement of *Lygus* Spp. (Hemiptera: Miridae) in Trap-Cropped Organic Strawberries. *Environ Entomol* **2013**, *42*, 770–778, doi:10.1603/EN12353.
29. Carignan, S.; Stewart, R.K.; Godin, C.; Boivin, G. Parasitism Activity of *Peristenus* Spp. (Hymenoptera: Braconidae) on *Lygus Lineolaris* (Hemiptera: Miridae) Nymphs Prior to the Establishment of *P. Digoneutis* in Southwestern Quebec. *Biocontrol Science and Technology* **2007**, *17*, 623–633.
30. Dumont, F.; Solà, M.; Provost, C.; Lucas, E. The Potential of *Nabis Americoferus* and *Orius Insidiosus* as Biological Control Agents of *Lygus Lineolaris* in Strawberry Fields. *Insects* **2023**, *14*, 385.
31. Gómez-Domínguez, N.S.; Rodríguez-Leyva, E.; Lomeli-Flores, J.R.; Velázquez-González, J.C.; Guzmán-Franco, A.W. Examining Potential Intra-Guild Predation of *Peristenus Relictus* by *Geocoris Punctipes*, and Its Effects on the Biological Control of *Lygus Lineolaris*. *Biological Control* **2021**, *156*, 104557.
32. Grab, H.; Danforth, B.; Poveda, K.; Loeb, G. Landscape Simplification Reduces Classical Biological Control and Crop Yield. *Ecological Applications* **2018**, *28*, 348–355.
33. Rose, R.I.; Lewis, D.R.; Tollefson, J.J. Parasitism of *Lygus Lineolaris* Palisot de Beauvois (Heteroptera: Miridae) by *Anaphes Iole* Girault (Hymenoptera: Mymaridae) in Strawberries. *Journal of the Kansas Entomological Society* **1996**.
34. Snodgrass, G.L.; Scott, W.P. Seasonal Changes in Pyrethroid Resistance in Tarnished Plant Bug (Heteroptera: Miridae) Populations during a Three-Year Period in the Delta Area of Arkansas, Louisiana, and Mississippi. *Journal of economic entomology* **2000**, *93*, 441–446.
35. Zhu, Y.C.; Snodgrass, G.L. Cytochrome BlackwellScience,Ltd P450 CYP6X1 cDNAs and mRNA Expression Levels in Three Strains of the Tarnished Plant Bug *Lygus Lineolaris* (Heteroptera: Miridae) Having Different Susceptibilities to Pyrethroid Insecticide. *Insect Molecular Biology* **2003**, *11*.
36. Guedes, N.M.P.; Guedes, R.N.C.; Ferreira, G.H.; Silva, L.B. Flight Take-off and Walking Behavior of Insecticide-Susceptible and-Resistant Strains of *Sitophilus Zeamais* Exposed to Deltamethrin. *Bulletin of entomological research* **2009**, *99*, 393–400.
37. Hubbard, C.B.; Gerry, A.C. Genetic Evaluation and Characterization of Behavioral Resistance to Imidacloprid in the House Fly. *Pesticide Biochemistry and Physiology* **2021**, *171*, 104741, doi:10.1016/j.pestbp.2020.104741.
38. Zalucki, M.; Furlong, M. Behavior as a Mechanism of Insecticide Resistance: Evaluation of the Evidence. *Current Opinion in Insect Science* **2017**, *21*, 19–25, doi:10.1016/j.cois.2017.05.006.
39. Nansen, C.; Baissac, O.; Nansen, M.; Powis, K.; Baker, G. Behavioral Avoidance-Will Physiological Insecticide Resistance Level of Insect Strains Affect Their Oviposition and Movement Responses? *PLoS one* **2016**, *11*, e0149994.
40. Carrière, Y.; Ellsworth, P.C.; Dutilleul, P.; Eilers-Kirk, C.; Barkley, V.; Antilla, L. A GIS-Based Approach for Areawide Pest Management: The Scales of *Lygus Hesperus* Movements to Cotton from Alfalfa, Weeds, and Cotton. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **2006**, *118*, 203–210.
41. Joseph, S.V.; Rijal, J. Walking Capacity of *Lygus Hesperus* 1st Fifth Instars in a Laboratory and Outdoors. *Southwestern Entomologist* **2019**, *44*, 403–408.
42. Rancourt, B.; Vincent, C.; De Oliveira, D. Circadian Activity of *Lygus Lineolaris* (Hemiptera: Miridae) and Effectiveness of Sampling Techniques in Strawberry Fields. *ec* **2000**, *93*, 1160–1166, doi:10.1603/0022-0493-93.4.1160.
43. Gyawali, P.; Kim, H.; Vance, D.R.; Khodaverdi, H.; Mantri, A.; Nansen, C. Can Insects Assess Environmental Risk? Movement Responses and Nymph Emergence in Response to Insecticides. *Agriculture* **2023**, *13*, 723.
44. Stearns, S.C. Trade-Offs in Life-History Evolution. *Functional Ecology* **1989**, *3*, 259, doi:10.2307/2389364.



45. Arnold, S.J. Morphology, Performance and Fitness. *Am Zool* **1983**, 23, 347–361, doi:10.1093/icb/23.2.347.
46. Kingsolver, J.G. Introduction: The Evolution of Morphology, Performance, and Fitness. *Integrative and Comparative Biology* **2003**, 43, 361–366, doi:10.1093/icb/43.3.361.
47. Bennett, A.F. Integrated Studies of Locomotor Performance. *Complex Organismal Functions: Integration and Evolution in Vertebrates* **1989**.
48. Husak, J.F.; Ferguson, H.A.; Lovern, M.B. Trade-Offs among Locomotor Performance, Reproduction and Immunity in Lizards. *Functional Ecology* **2016**, 30, 1665–1674.
49. Lee, W.-S.; Monaghan, P.; Metcalfe, N.B. The Trade-off between Growth Rate and Locomotor Performance Varies with Perceived Time until Breeding. *Journal of Experimental Biology* **2010**, 213, 3289–3298.
50. Vanhooydonck, B.; Van Damme, R. Evolutionary Trade-Offs in Locomotor Capacities in Lacertid Lizards: Are Splendid Sprinters Clumsy Climbers? *Journal of evolutionary biology* **2001**, 14, 46–54.
51. Careau, V.; Wilson, R.S. Of Uberfleas and Krakens: Detecting Trade-Offs Using Mixed Models. *Integrative and comparative biology* **2017**, 57, 362–371.
52. Careau, V.; Wilson, R.S. Performance Trade-Offs and Ageing in the ‘World’s Greatest Athletes.’ *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **2017**, 284, 20171048.
53. Dingemanse, N.J.; Dochtermann, N.A. Quantifying Individual Variation in Behaviour: Mixed-Effect Modelling Approaches. *Journal of Animal Ecology* **2013**, 82, 39–54.
54. R Core Team R: A Language and Environment for Statistical Computing 2021.
55. Bürkner, P. Brms: An R Package for Bayesian Multilevel Models Using Stan. *Journal of Statistical Software* **2017**, 80, 1–28.
56. Dohm, M.R. Repeatability Estimates Do Not Always Set an Upper Limit to Heritability: *Interpreting Repeatability Estimates*. *Functional Ecology* **2002**, 16, 273–280, doi:10.1046/j.1365-2435.2002.00621.x.
57. Falconer, D.S.; Mackay, T.F.C. *Introduction to Quantitative Genetics*; Longman; 4th edition, 1983;
58. Lynch, M.; Walsh, B. *Genetics and Analysis of Quantitative Traits*.; Sinauer Sunderland, 1998;
59. Lima, S.L.; Dill, L.M. Behavioral Decisions Made under the Risk of Predation: A Review and Prospectus. *Can. J. Zool.* **1990**, 68, 619–640, doi:10.1139/z90-092.
60. Goldman, D.I.; Chen, T.S.; Dudek, D.M.; Full, R.J. Dynamics of Rapid Vertical Climbing in Cockroaches Reveals a Template. *Journal of Experimental Biology* **2006**, 209, 2990–3000, doi:10.1242/jeb.02322.
61. Ritzmann, R.E.; Quinn, R.D.; Watson, J.T.; Zill, S.N. Insect Walking and Biorobotics: A Relationship with Mutual Benefits. *BioScience* **2000**, 50, 23, doi:10.1641/0006-3568(2000)050[0023:IWABAR]2.3.CO;2.
62. Full, R.J.; Tullis, A. Energetics of Ascent: Insects on Inclines. *Journal of Experimental Biology* **1990**, 149, 307–317, doi:10.1242/jeb.149.1.307.
63. Hawkins, N.J.; Bass, C.; Dixon, A.; Neve, P. The Evolutionary Origins of Pesticide Resistance: The Evolutionary Origins of Pesticide Resistance. *Biol Rev* **2019**, 94, 135–155, doi:10.1111/brv.12440.
64. Karlsson Green, K.; Stenberg, J.A.; Lankinen, Å. Making Sense of Integrated Pest Management (IPM) in the Light of Evolution. *Evol Appl* **2020**, 13, 1791–1805, doi:10.1111/eva.13067.
65. Péliissié, B.; Crossley, M.S.; Cohen, Z.P.; Schoville, S.D. Rapid Evolution in Insect Pests: The Importance of Space and Time in Population Genomics Studies. *Current Opinion in Insect Science* **2018**, 26, 8–16, doi:10.1016/j.cois.2017.12.008.
66. Feyereisen, R.; Dermauw, W.; Van Leeuwen, T. Genotype to Phenotype, the Molecular and Physiological Dimensions of Resistance in Arthropods. *Pesticide Biochemistry and Physiology* **2015**, 121, 61–77, doi:10.1016/j.pestbp.2015.01.004.
67. ffrench-Constant, R.H.; Daborn, P.J.; Goff, G.L. The Genetics and Genomics of Insecticide Resistance. *Trends in Genetics* **2004**, 20, 163–170, doi:10.1016/j.tig.2004.01.003.
68. Panini, M.; Manicardi, G.C.; Moores, G.D.; Mazzoni, E. An Overview of the Main Pathways of Metabolic Resistance in Insects. *Invertebrate Survival Journal* **2016**, 13, 326–335.
69. Kruuk, L.E.B. Estimating Genetic Parameters in Natural Populations Using the ‘Animal Model.’ *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* **2004**, 359, 873–890, doi:10.1098/rstb.2003.1437.
70. Wilson, A.J.; Réale, D.; Clements, M.N.; Morrissey, M.M.; Postma, E.; Walling, C.A.; Kruuk, L.E.B.; Nussey, D.H. An Ecologist’s Guide to the Animal Model. *Journal of Animal Ecology* **2010**, 79, 13–26, doi:10.1111/j.1365-2656.2009.01639.x.



71. Sparks, T.C.; Lockwood, J.A.; Byford, R.L.; Graves, J.B.; Leonard, B.R. The Role of Behavior in Insecticide Resistance. *Pestic. Sci.* **1989**, *26*, 383–399, doi:10.1002/ps.2780260406.
72. Zalucki, M.; Furlong, M. Behavior as a Mechanism of Insecticide Resistance: Evaluation of the Evidence. *Current Opinion in Insect Science* **2017**, *21*, 19–25, doi:10.1016/j.cois.2017.05.006.
73. Cervantes, F.A.; Backus, E.A.; Godfrey, L.; Rojas, M.G.; Akbar, W.; Clark, T.L. Quantitative Differences in Feeding Behavior of *Lygus Lineolaris* (Hemiptera: Miridae) on Transgenic and Nontransgenic Cotton. *Journal of Economic Entomology* **2019**, *112*, 1920–1925, doi:10.1093/jee/toz054.
74. Cooperband, M.F.; Allan, S.A. Effects of Different Pyrethroids on Landing Behavior of Female *Aedes Aegypti*, *Anopheles Quadrimaculatus*, and *Culex Quinquefasciatus* Mosquitoes (Diptera: Culicidae). *J Med Entomol* **2009**, *46*, 292–306, doi:10.1603/033.046.0214.
75. Hubbard, C.B.; Gerry, A.C. Genetic Evaluation and Characterization of Behavioral Resistance to Imidacloprid in the House Fly. *Pesticide Biochemistry and Physiology* **2021**, *171*, 104741, doi:10.1016/j.pestbp.2020.104741.
76. Wang, C.; Scharf, M.E.; Bennett, G.W. Behavioral and Physiological Resistance of the German Cockroach to Gel Baits (Blattodea: Blattellidae). *JOURNAL OF ECONOMIC ENTOMOLOGY* **2004**, *97*.
77. Balachandran, A.; Parajulee, M.N.; Kerns, D.L. Effect of Selected Insecticides on *Lygus Hesperus* (Heteroptera: Miridae) Oviposition Behavior in Cotton. *Environ Entomol* **2014**, *43*, 83–90, doi:10.1603/EN12181.
78. Jallow, M.F.A.; Hoy, C.W. Quantitative Genetics of Adult Behavioral Response and Larval Physiological Tolerance to Permethrin in Diamondback Moth (Lepidoptera: Plutellidae). *JOURNAL OF ECONOMIC ENTOMOLOGY* **2006**, *99*.
79. Nansen, C.; Baissac, O.; Nansen, M.; Powis, K.; Baker, G. Behavioral Avoidance - Will Physiological Insecticide Resistance Level of Insect Strains Affect Their Oviposition and Movement Responses? *PLoS ONE* **2016**, *11*, e0149994, doi:10.1371/journal.pone.0149994.
80. Sarfraz, M.; Dossall, L.M.; Keddie, B.A. Evidence for Behavioural Resistance by the Diamondback Moth, *Plutella Xylostella* (L.). *J Appl Entomology* **2005**, *129*, 340–341, doi:10.1111/j.1439-0418.2005.00969.x.
81. Fray, L.M.; Leather, S.R.; Powell, G.; Slater, R.; McIndoed, E.; Lind, R.J. Behavioural Avoidance and Enhanced Dispersal in Neonicotinoid-resistant *Myzus*. *Pest Management Science* **2013**, *70*, 88–96.
82. Graham, S.H.; Catchot, A.L.; Gore, J.; Cook, D.R.; Dodds, D. Tarnished Plant Bug (Heteroptera: Miridae) Behavioral Responses to Chemical Insecticides. *Insects* **2021**, *12*, 1072, doi:10.3390/insects12121072.
83. Romero, A.; Potter, M.F.; Haynes, K.F. Behavioral Responses of the Bed Bug to Insecticide Residues. *me* **2009**, *46*, 51–57, doi:10.1603/033.046.0107.
84. Barnett, S.A. EXPLORATORY BEHAVIOUR. *British Journal of Psychology* **1958**, *49*, 289–310, doi:10.1111/j.2044-8295.1958.tb00667.x.
85. Gunn, R. I.; Hartley, I.R.; Algar, A.C.; Niemelä, P.T.; Keith, S.A. Oikos - 2021 - Gunn - Understanding Behavioural Responses to Human-induced Rapid Environmental Change a Meta-analysis.Pdf. *Oikos* **2021**.
86. Roche, D.G.; Careau, V.; Binning, S.A. Demystifying Animal 'Personality' (or Not): Why Individual Variation Matters to Experimental Biologists. *Journal of Experimental Biology* **2016**, jeb.146712, doi:10.1242/jeb.146712.
87. Dochtermann, N.A.; Schwab, T.; Anderson Berdal, M.; Dalos, J.; Royauté, R. The Heritability of Behavior: A Meta-Analysis. *Journal of Heredity* **2019**, *110*, 403–410.
88. Smith, B.R.; Blumstein, D.T. Fitness Consequences of Personality: A Meta-Analysis. *Behavioral Ecology* **2008**, *19*, 448–455, doi:10.1093/beheco/arm144.
89. Perals, D.; Griffin, A.S.; Bartomeus, I.; Sol, D. Revisiting the Open-Field Test: What Does It Really Tell Us about Animal Personality? *Animal Behaviour* **2017**, *123*, 69–79, doi:10.1016/j.anbehav.2016.10.006.
90. Houslay, T.M.; Earley, R.L.; White, S.J.; Lammers, W.; Grimmer, A.J.; Travers, L.M.; Johnson, E.L.; Young, A.J.; Wilson, A. Genetic Integration of Behavioural and Endocrine Components of the Stress Response. *eLife* **2022**, *11*, e67126, doi:10.7554/eLife.67126.



91. Walsh, B.; Blows, M.W. Abundant Genetic Variation + Strong Selection = Multivariate Genetic Constraints: A Geometric View of Adaptation. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* **2009**, *40*, 41–59, doi:10.1146/annurev.ecolsys.110308.120232.
92. Margus, A.; Piironen, S.; Lehmann, P.; Tikka, S.; Karvanen, J.; Lindström, L. Sublethal Pyrethroid Insecticide Exposure Carries Positive Fitness Effects Over Generations in a Pest Insect. *Sci Rep* **2019**, *9*, 11320, doi:10.1038/s41598-019-47473-1.
93. Han, C.S.; Gosden, T.P.; Dingemans, N.J. Protein Deprivation Facilitates the Independent Evolution of Behavior and Morphology. *Evolution* **2019**, *73*, 1809–1820, doi:10.1111/evo.13802.
94. Niemelä, P.T.; Dingemans, N.J. Meta-Analysis Reveals Weak Associations between Intrinsic State and Personality. *Proc. R. Soc. B.* **2018**, *285*, 20172823, doi:10.1098/rspb.2017.2823.
95. Videlier, M.; Rundle, H.D.; Careau, V. Sex-specific Genetic (Co)Variances of Standard Metabolic Rate, Body Mass and Locomotor Activity in *Drosophila Melanogaster*. *J of Evolutionary Biology* **2021**, *34*, 1279–1289, doi:10.1111/jeb.13887.
96. Zablocki-Thomas, P.B.; Herrel, A.; Karanewsky, C.J.; Aujard, F.; Pouydebat, E. Heritability and Genetic Correlations of Personality, Life History and Morphology in the Grey Mouse Lemur (*Microcebus Murinus*). *R. Soc. open sci.* **2019**, *6*, 190632, doi:10.1098/rsos.190632.
97. Cox, R.M.; Calsbeek, R. Sexually Antagonistic Selection, Sexual Dimorphism, and the Resolution of Intralocus Sexual Conflict. *The American Naturalist* **2009**, *173*, 176–187, doi:10.1086/595841.
98. Lande, R. Sexual Dimorphism, Sexual Selection, and Adaptation in Polygenic Characters. *Evolution* **1980**, *34*, 292–305.
99. Poissant, J.; Wilson, A.J.; Coltman, D.W. SEX-SPECIFIC GENETIC VARIANCE AND THE EVOLUTION OF SEXUAL DIMORPHISM: A SYSTEMATIC REVIEW OF CROSS-SEX GENETIC CORRELATIONS. *Evolution* **2009**, *64*, 97–107, doi:10.1111/j.1558-5646.2009.00793.x.
100. Bonduriansky, R.; Chenoweth, S.F. Intralocus Sexual Conflict. *Trends in Ecology & Evolution* **2009**, *24*, 280–288, doi:10.1016/j.tree.2008.12.005.
101. McGlothlin, J.W.; Cox, R.M.; Brodie, E.D. Sex-Specific Selection and the Evolution of Between-Sex Genetic Covariance. *Journal of Heredity* **2019**, *110*, 422–432, doi:10.1093/jhered/esz031.
102. Van Doorn, G.S. Intralocus Sexual Conflict. *Annals of the New York Academy of Sciences* **2009**, *1168*, 52–71, doi:10.1111/j.1749-6632.2009.04573.x.
103. Gosden, T.P.; Chenoweth, S.F. The Evolutionary Stability of Cross-Sex, Cross-Trait Genetic Covariances. *Evolution* **2014**, *68*, 1687–1697.
104. Gosden, T.P.; Shastri, K.-L.; Innocenti, P.; Chenoweth, S.F. The B-Matrix Habors Significant and Sex-Specific Constraints on the Evolution of Multicharacter Sexual Dimorphism. *Evolution* **2012**, *66*, 2106–2116, doi:10.1111/j.1558-5646.2012.01579.x.
105. Hangartner, S.; Lasne, C.; Sgrò, C.M.; Connallon, T.; Monro, K. Genetic Covariances Promote Climatic Adaptation in Australian *Drosophila*. *Evolution* **2020**, *74*, 326–337, doi:10.1111/evo.13831.
106. Jumbo-Lucioni, P.; Ayroles, J.F.; Chambers, M.M.; Jordan, K.W.; Leips, J.; Mackay, T.F.; Luca, M.D. Genetics Analysis of Body Weight and Energy Metabolism Traits in *Drosophila Melanogaster*. *BMC Genomics* **2010**, *11*.
107. Sztepanacz, J.L.; Houle, D. Cross-sex Genetic Covariances Limit the Evolvability of Wing-shape within and among Species of *Drosophila*. *Evolution* **2019**, *73*, 1617–1633, doi:10.1111/evo.13788.
108. Han, C.S.; Dingemans, N.J. Sex-Dependent Expression of Behavioural Genetic Architectures and the Evolution of Sexual Dimorphism. *Proc. R. Soc. B.* **2017**, *284*, 20171658, doi:10.1098/rspb.2017.1658.
109. Long, T.A.F.; Rice, W.R. Adult Locomotor Activity Mediates Intralocus Sexual Conflict in a Laboratory-Adapted Population of *Drosophila Melanogaster*. *Proc. R. Soc. B.* **2007**, *274*, 3105–3112, doi:10.1098/rspb.2007.1140.
110. Royauté, R.; Hedrick, A.; Doehrmann, N. Sex-Specific Behavioral Syndromes Allow the Independent Evolution of Behavioral Dimorphism. *EcoEvoRxiv* **2021**, doi:10.32942/OSF.IO/4ABP6.
111. Parys, K.A.; Luttrell, R.G.; Snodgrass, G.L.; Portilla, M.R. Patterns of Tarnished Plant Bug (Hemiptera: Miridae) Resistance to Pyrethroid Insecticides in the Lower Mississippi Delta for 2008–2015: Linkage to Pyrethroid Use and Cotton Insect Management. *Journal of Insect Science* **2018**, *18*, doi:10.1093/jisesa/iey015.



112. Haye, T.; Kuhlmann, U.; Goulet, H.; Mason, P.G. Controlling Lygus Plant Bugs (Heteroptera: Miridae) with European *Peristenus Relictus* (Hymenoptera: Braconidae) in Canada – Risky or Not? *Bulletin of Entomological Research* **2006**, *96*, 187–196, doi:10.1079/BER2005414.
113. Pickett, C.H.; Nieto, D.J.; Bryer, J.A.; Swezey, S.L.; Stadtherr, M. Long Term Post-Release Impacts of the Introduced Parasitoid *Peristenus Relictus* (Hymenoptera: Braconidae) on *Lygus* Spp. (Hemiptera: Miridae) Populations in California. *Biological Control* **2017**, *114*, 30–38, doi:10.1016/j.biocontrol.2017.07.002.
114. Dorman, S.J.; Gross, A.D.; Musser, F.R.; Catchot, B.D.; Smith, R.H.; Reisig, D.D.; Reay-Jones, F.P.; Greene, J.K.; Roberts, P.M.; Taylor, S.V. Resistance Monitoring to Four Insecticides and Mechanisms of Resistance in *LYGUS LINEOLARIS* Palisot de Beauvois (Hemiptera: Miridae) Populations of Southeastern USA Cotton. *Pest Manag Sci* **2020**, *76*, 3935–3944, doi:10.1002/ps.5940.
115. Snodgrass, G.L. Insecticide Resistance in Field Populations of the Tarnished Plant Bug (Heteroptera: Miridae) in Cotton in the Mississippi Delta. *Journal of Economic Entomology* **1996**, *89*, 783–790, doi:10.1093/jee/89.4.783.
116. Zhu, Y.C.; West, S.; Snodgrass, G.; Luttrell, R. Variability in Resistance-Related Enzyme Activities in Field Populations of the Tarnished Plant Bug, *Lygus Lineolaris*. *Pesticide Biochemistry and Physiology* **2011**, *99*, 265–273, doi:10.1016/j.pestbp.2011.01.005.
117. Garnier, S. TrackR - Multi-Object Tracking with R 2022.
118. Schielzeth, H. Simple Means to Improve the Interpretability of Regression Coefficients: *Interpretation of Regression Coefficients*. *Methods in Ecology and Evolution* **2010**, *1*, 103–113, doi:10.1111/j.2041-210X.2010.00012.x.
119. Gelman, A. Prior Distributions for Variance Parameters in Hierarchical Models (Comment on Article by Browne and Draper). *Bayesian Anal.* **2006**, *1*, 515–534, doi:10.1214/06-BA117A.
120. O’Hara, R.B.; Cano, J.M.; Ovaskainen, O.; Teplitsky, C.; Alho, J.S. Bayesian Approaches in Evolutionary Quantitative Genetics. *Journal of Evolutionary Biology* **2008**, *21*, 949–957, doi:10.1111/j.1420-9101.2008.01529.x.
121. Villemereuil, P. On the Relevance of Bayesian Statistics and MCMC for Animal Models. *J Anim Breed Genet* **2019**, *136*, 339–340, doi:10.1111/jbg.12426.
122. Sih, A.; Bell, A.M.; Johnson, J.C.; Ziemba, R.E. Behavioral Syndromes: An Integrative Overview. *The quarterly review of biology* **2004**, *79*, 241–277.
123. Réale, D.; Garant, D.; Humphries, M.M.; Bergeron, P.; Careau, V.; Montiglio, P.-O. Personality and the Emergence of the Pace-of-Life Syndrome Concept at the Population Level. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **2010**, *365*, 4051–4063.
124. Dochtermann, N.A.; Schwab, T.; Anderson Berdal, M.; Dalos, J.; Royauté, R. The Heritability of Behavior: A Meta-Analysis. *Journal of Heredity* **2019**, *110*, 403–410, doi:10.1093/jhered/esz023.
125. Bell, A.M.; Hankison, S.J.; Laskowski, K.L. The Repeatability of Behaviour: A Meta-Analysis. *Animal behaviour* **2009**, *77*, 771–783.
126. Mitchell, D.J.; Fanson, B.G.; Beckmann, C.; Biro, P.A. Towards Powerful Experimental and Statistical Approaches to Study Intraindividual Variability in Labile Traits. *Royal Society open science* **2016**, *3*, 160352.
127. White, C.R.; Schimpf, N.G.; Cassey, P. The Repeatability of Metabolic Rate Declines with Time. *Journal of Experimental Biology* **2013**, *216*, 1763–1765.
128. Blackmer, J.L.; Naranjo, S.E.; Williams, L.H. Tethered and Untethered Flight by *Lygus Hesperus* and *Lygus Lineolaris* (Heteroptera: Miridae). *Environ Entomol* **2004**, *33*, 1389–1400, doi:10.1603/0046-225X-33.5.1389.
129. Fleischer, S.J.; Gaylor, M.J.; Hue, N.V. Dispersal of *Lygus Lineolaris* (Heteroptera: Miridae) Adults Through Cotton Following Nursery Host Destruction. *Environmental Entomology* **1988**, *17*, 533–541, doi:10.1093/ee/17.3.533.
130. Lu, Y.; Wu, K.; Guo, Y. Flight Potential of *Lygus Lucorum* (Meyer-Dur) (Heteroptera: Miridae). *ENVIRONMENTAL ENTOMOLOGY* **2007**, *36*.
131. Stewart, S.D.; Gaylor, >Michael J. Effects of Age, Sex, and Reproductive Status on Flight by the Tarnished Plant Bug (Heteroptera: Miridae). *Environmental Entomology* **1994**, *23*, 80–84, doi:10.1093/ee/23.1.80.



132. Blows, M.W.; McGuigan, K. The Distribution of Genetic Variance across Phenotypic Space and the Response to Selection. *Mol Ecol* **2015**, *24*, 2056–2072, doi:10.1111/mec.13023.
133. Sztepanacz, J.L.; Rundle, H.D. REDUCED GENETIC VARIANCE AMONG HIGH FITNESS INDIVIDUALS: INFERRING STABILIZING SELECTION ON MALE SEXUAL DISPLAYS IN *DROSOPHILA SERRATA*: INFERRING STABILIZING SELECTION ON SEXUAL DISPLAYS. *Evolution* **2012**, *66*, 3101–3110, doi:10.1111/j.1558-5646.2012.01658.x.
134. Perera, O.P.; Gore, J.; Snodgrass, G.L.; Jackson, R.E.; Allen, K.C.; Abel, C.A.; Luttrell, R.G. Temporal and Spatial Genetic Variability Among Tarnished Plant Bug (Hemiptera: Miridae) Populations in a Small Geographic Area. *Annals of the Entomological Society of America* **2015**, *108*, 181–192, doi:10.1093/aesa/sau016.
135. Kralj-Fišer, S.; Schneider, J.M.; Kuntner, M.; Laskowski, K.; Garcia-Gonzalez, F. The Genetic Architecture of Behavioral Traits in a Spider. *Ecol. Evol.* **2021**, *11*, 5381–5392, doi:10.1002/ece3.7430.
136. Fuchikawa, T.; Okada, K. Inter- and Intrasexual Genetic Correlations of Exaggerated Traits and Locomotor Activity. *J. Evol. Biol.* **2013**, *26*, 1979–1987, doi:10.1111/jeb.12197.
137. Bonduriansky, R.; Rowe, L. INTRALOCUS SEXUAL CONFLICT AND THE GENETIC ARCHITECTURE OF SEXUALLY DIMORPHIC TRAITS IN *PROCHYLIZA XANTHOSTOMA* (DIPTERA: PIOPHILIDAE). *Evolution* **2005**, *59*, 1965–1975.
138. Coll, M.; Guershon, M. Omnivory in Terrestrial Arthropods: Mixing Plant and Prey Diets. *Annual review of entomology* **2002**, *47*, 267–297.
139. Bolnick, D.I.; Yang, L.H.; Fordyce, J.A.; Davis, J.M.; Svanbäck, R. Measuring Individual-Level Resource Specialization. *Ecology* **2002**, *83*, 2936–2941.
140. Bolnick, D.I.; Svanbäck, R.; Fordyce, J.A.; Yang, L.H.; Davis, J.M.; Hulsey, C.D.; Forister, M.L. The Ecology of Individuals: Incidence and Implications of Individual Specialization. *The American Naturalist* **2002**, *161*, 1–28.
141. Araújo, M.S.; Bolnick, D.I.; Layman, C.A. The Ecological Causes of Individual Specialisation. *Ecology letters* **2011**, *14*, 948–958.
142. Dumont, F.; Aubry, O.; Lucas, E. From Evolutionary Aspects of Zoophytophagy to Biological Control. *Frontiers in Ecology and Evolution* **2018**, *6*, 221.
143. Dumont, F.; Lucas, E.; Réale, D. Coexistence of Zoophytophagous and Phytozoophagous Strategies Linked to Genotypic Diet Specialization in Plant Bug. *PloS one* **2017**, *12*, e0176369.
144. Bolnick, D.I.; Amarasekare, P.; Araújo, M.S.; Bürger, R.; Levine, J.M.; Novak, M.; Rudolf, V.H.; Schreiber, S.J.; Urban, M.C.; Vasseur, D.A. Why Intraspecific Trait Variation Matters in Community Ecology. *Trends in ecology & evolution* **2011**, *26*, 183–192.
145. Dumont, F.; Lucas, E.; Réale, D. Evidence of Genetic Basis of Zoophagy and Nymphal Developmental Time in Isogroup Lines of the Zoophytophagous Mullein Bug, *Campylomma Verbasci*. *BioControl* **2016**, *61*, 425–435.
146. Chinchilla-Ramírez, M.; Pérez-Hedo, M.; Pannebakker, B.A.; Urbaneja, A. Genetic Variation in the Feeding Behavior of Isofemale Lines of *Nesidiocoris Tenuis*. *Insects* **2020**, *11*, 513.
147. Dumont, F.; Réale, D.; Lucas, E. Isogroup Selection to Optimize Biocontrol Increases Cannibalism in Omnivorous (Zoophytophagous) Bugs. *Insects* **2017**, *8*, 74.
148. Castañé, C.; Arnó, J.; Gabarra, R.; Alomar, O. Plant Damage to Vegetable Crops by Zoophytophagous Mirid Predators. *Biological control* **2011**, *59*, 22–29.
149. Lindquist, R.K.; Sorensen, E.L. Interrelationships among Aphids, Tarnished Plant Bugs, and Alfalfas. *Journal of Economic Entomology* **1970**, *63*, 192–195.
150. Cleveland, T.C. Predation by Tarnished Plant Bugs (Heteroptera: Miridae) of *Heliothis* (Lepidoptera: Noctuidae) Eggs and Larvae. *Environmental Entomology* **1987**, *16*, 37–40.
151. Hagler, J.R.; Jackson, C.G.; Blackmer, J.L. Diet Selection Exhibited by Juvenile and Adult Lifestages of the Omnivores Western Tarnished Plant Bug, *Lygus Hesperus* and Tarnished Plant Bug, *Lygus Lineolaris*. *Journal of Insect Science* **2010**, *10*, 1–13, doi:10.1673/031.010.12701.
152. Agustí, N.; Cohen, A.C. *Lygus Hesperus* and *L. Lineolaris* (Hemiptera: Miridae), Phytophages, Zoophages, or Omnivores: Evidence of Feeding Adaptations Suggested by the Salivary and Midgut Digestive Enzymes. *Journal of Entomological Science* **2000**, *35*, 176–186.



153. Perera, O.; Shelby, K.; Pierce, C.; Snodgrass, G. Expression Profiles of Digestive Genes in the Gut and Salivary Glands of Tarnished Plant Bug (Hemiptera: Miridae). *Journal of Insect Science* **2021**, *21*, doi:10.1093/jisesa/ieab028.
154. Wheeler, A.G. *Biology of the Plant Bugs (Hemiptera: Miridae): Pests, Predators, Opportunists*; Cornell University Press, 2001;
155. Coblenz, K.E.; Rosenblatt, A.E.; Novak, M. The Application of Bayesian Hierarchical Models to Quantify Individual Diet Specialization. *Ecology* **2017**, *98*, 1535–1547, doi:10.1002/ecy.1802.
156. Stoffel, M.A.; Nakagawa, S.; Schielzeth, H. rptR: Repeatability Estimation and Variance Decomposition by Generalized Linear Mixed-effects Models. *Methods Ecol Evol* **2017**, *8*, 1639–1644, doi:10.1111/2041-210X.12797.
157. Nakagawa, S.; Schielzeth, H. Repeatability for Gaussian and Non-Gaussian Data: A Practical Guide for Biologists. *Biological Reviews* **2010**, *85*, 935–956.
158. Solà, M.; Dumont, F.; Provost, C.; Lucas, E. Lygus Lineolaris Nutritional Needs and Host Choices for IPM Strategies with Predators and Trap Crops. *CIRAA* **2020**, *12*, 280–290.
159. Newsome, S.D.; Tinker, M.T.; Gill, V.A.; Hoyt, Z.N.; Doroff, A.; Nichol, L.; Bodkin, J.L. The Interaction of Intraspecific Competition and Habitat on Individual Diet Specialization: A near Range-Wide Examination of Sea Otters. *Oecologia* **2015**, *178*, 45–59.
160. Svanbäck, R.; Bolnick, D.I. Intraspecific Competition Affects the Strength of Individual Specialization: An Optimal Diet Theory Method. *Evolutionary Ecology Research* **2005**, *7*, 993–1012.
161. Toscano, B.J.; Gownaris, N.J.; Heerhartz, S.M.; Monaco, C.J. Personality, Foraging Behavior and Specialization: Integrating Behavioral and Food Web Ecology at the Individual Level. *Oecologia* **2016**, *182*, 55–69.
162. George, J.; Glover, J.P.; Gore, J.; Crow, W.D.; Reddy, G.V. Biology, Ecology, and Pest Management of the Tarnished Plant Bug, Lygus Lineolaris (Palisot de Beauvois) in Southern Row Crops. *Insects* **2021**, *12*, 807.
163. Mohammadpour, M.; Hosseini, M.; Karimi, J.; Hosseinaveh, V. Effect of Age-Dependent Parasitism in Eggs of Tuta Absoluta (Lepidoptera: Gelechiidae) on Intraguild Predation between Nabid Pseudoferus (Hemiptera: Nabidae) and Trichogramma Brassicae (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Journal of Insect Science* **2019**, *19*, 27.
164. Cabello, T.; Gallego, J.R.; Fernandez-Maldonado, F.J.; Soler, A.; Beltran, D.; Parra, A.; Vila, E. The Damsel Bug Nabid Pseudoferus (Hem.: Nabidae) as a New Biological Control Agent of the South American Tomato Pinworm, Tuta Absoluta (Lep.: Gelechiidae), in Tomato Crops of Spain. *The damsel bug Nabid pseudoferus (Hem.: Nabidae) as a new biological control agent of the South American Tomato Pinworm, Tuta absoluta (Lep.: Gelechiidae), in tomato crops of Spain.* **2009**, *49*, 219–223.
165. Sih, A. Understanding Variation in Behavioural Responses to Human-Induced Rapid Environmental Change: A Conceptual Overview. *Animal Behaviour* **2013**, *85*, 1077–1088.
166. Sih, A.; Ferrari, M.C.; Harris, D.J. Evolution and Behavioural Responses to Human-Induced Rapid Environmental Change. *Evolutionary applications* **2011**, *4*, 367–387.
167. Sih, A.; Cote, J.; Evans, M.; Fogarty, S.; Pruitt, J. Ecological Implications of Behavioural Syndromes. *Ecology letters* **2012**, *15*, 278–289.

Problèmes

- Veuillez décrire les obstacles ou les problèmes dans la réalisation de cette activité durant la période visée par le rapport. Comment ont-ils été surmontés ou comment comptez-vous les surmonter?
- Veuillez décrire tout changement potentiel au plan de travail et au budget durant la période visée par le rapport. Comment ont-ils été gérés ou comment comptez-vous les gérer?



Aucun problème rencontré, le projet a été terminé dans les conditions prévues.

Réalisations clé

Une réalisation clé est une importante réalisation ou un résultat concret que les agriculteurs, le secteur ou le milieu scientifique pourraient utiliser. Veuillez décrire des réalisations clé (un à trois paragraphes) qui répondent à l'un des critères suivants :

- 22) Le produit à un certain potentiel commercial (tous les essais sont terminés).
- 23) Le produit a été commercialisé.
- 24) Le produit a été adopté par le secteur.

Vous pourriez donner comme exemples de résultats concrets une durabilité accrue (pratique de gestion bénéfique), la réduction des coûts, l'augmentation de la productivité ou une rentabilité accrue. Veuillez prendre note que les renseignements fournis seront utilisés à des fins de communication seulement.

Si aucune réalisation clé n'a été achevée à ce stade, veuillez ne rien inscrire ici.

Nos expériences ont démontré une variabilité phénotypique et génotypique dans les comportements locomoteurs et d'alimentation de la punaise terne. Ainsi, les populations de punaises ternes sont susceptibles d'évoluer en réponse aux pratiques agricoles et aux méthodes de lutte utilisées pour réguler ce ravageur. Le potentiel évolutif doit donc être pris en compte dans la gestion de la punaise terne. Le développement de résistance physiologique aux insecticides fait déjà partie intégrante de la gestion de ce ravageur en milieu agricole. Cependant, nos résultats démontrent qu'une résistance comportementale (i.e., comportement d'évitement) pourrait être développée autant en réponse aux insecticides qu'aux ennemis naturels. De plus, la variabilité génétique dans les comportements alimentaires suggère que les individus dans les populations de punaises ternes ont une valeur économique différente. Certains individus causeraient potentiellement plus de dommages que d'autres.

Ces connaissances ont un intérêt pour les scientifiques autant au niveau de la recherche fondamentale qu'appliquée. Dans leur forme actuelle, nos résultats permettent de mieux comprendre le système et de nourrir des recherches qui mèneront à l'élaboration de stratégie spécifique à la ferme. Ces stratégies prendront la forme des mesures prises pour réduire les risques de développement de résistance aux insecticides. Les producteurs devront miser sur des méthodes de luttés diverses et sur un aménagement optimal de leur agroécosystème.