



## 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.

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



**Numéro de l'activité (EC) : 11**

**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 2

**Chercheur principal :**

**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.



Deux projets avec des stagiaires post-doctoraux ont été réalisés en lien avec les objectifs de recherche de cette activité. Les deux rapports de recherche sont présentés.

## **Prédiction de l'évolution du comportement d'exploration et de la masse corporelle de la punaise terne *Lygus lineolaris*.**

**Mathieu Videlier, François Dumont & Pierre-Olivier Montiglio**

### Résumé

La punaise terne est un important ravageur présent à travers l'Amérique du Nord. Sa présence durant la période estivale affecte la productivité des champs de fruits tel que celle des fraises au Québec. Face aux méthodes de lutte utilisées par les producteurs, les populations de ravageur s'adaptent et développent des résistances physiologiques mais aussi comportementales. Cependant l'évolution de ses résistances comportementales est encore mal comprise. L'objectif de ce projet est de prédire la réponse à la sélection du comportement d'exploration pour mieux comprendre l'apparition des résistances comportementales. Cela se fait à l'aide de simulation de gradient de sélection, d'estimations de la matrice génétique  $G$  et  $G_{fm}$  du comportement d'exploration ainsi que de la masse obtenue dans une étude précédente sur une population de punaise terne. Nous observons une faible réactivité générale du comportement et de la masse, et des effets indirects de la réponse à la sélection due aux covariances génétiques positives entre ces caractères. Cependant, les sexes semblent ne pas s'interférer dans leur réponse à la sélection, reflétant une possible dissociation évolutive entre les sexes sur ces caractères.

### Introduction

La punaise terne *Lygus lineolaris* (Palisot de Beauvois) (Hemiptera : Miridae) est un important ravageur de plusieurs cultures en Amérique de Nord [1]. En raison de son alimentation [2,3], sa présence dans les champs agricoles induit, notamment, une perte de rendement et la déformation des fruits [1,3,4] causant d'importantes pertes économiques pour les producteurs. L'une des principales productions agricoles touchées par ce ravageur au Québec est la fraise [5]. Différentes stratégies ont été mises en place pour réguler la densité de populations de ce ravageur [1,6–8]. La principale stratégie reste l'utilisation d'insecticides à large spectre pour limiter les pertes économiques [1,5,9]. Cependant, les ravageurs peuvent développer une résistance qui annule ou altère l'efficacité de cette stratégie [10,11]. *L. lineolaris* ne fait pas exception à la règle et plusieurs études ont mise en avant le développement de résistance aux pesticides chez cette espèce [12–15].

En plus d'une résistance physiologique comme la détoxification physiologique, il est également possible que les ravageurs développent des résistances dites comportementales réduisant l'exposition aux composés toxiques [16–18]. Le comportement d'évitement est le principale comportement étudié comme résistance comportementale [18]. Par exemple, l'évitement alimentaire de ressources traitées avec un pesticide chez la blatte [19], chez le moustique [20] ou encore chez la mouche [21], le comportement d'évitement concernant le choix des sites de ponte d'œufs chez le papillon de nuit [20,22,23] ou simplement le comportement d'évitement de contact ou de dispersion face à des zones traitées aux pesticides comme chez les punaises de lit, le pucerons ou encore la punaise terne [16,24,25]. Ces changements de comportement induit par les pesticides sont des changements dans les choix et les préférences des ravageurs. Cependant avant de pouvoir faire un choix, il est essentiel que l'individu explore son environnement pour se confronter à ces choix [26,27]. Ainsi, en amont du comportement d'évitement, le comportement d'exploration doit être la racine de la résistance comportementale en nature. Pour mieux comprendre l'impact de ses stratégies de régulation des populations de ravageurs, il est donc essentiel de mieux comprendre le comportement de ces insectes et la manière dont ils peuvent évoluer.

Récemment, une étude de génétique quantitative a été mise en place en laboratoire pour étudier le comportement d'exploration dans une arène standardisée d'une population de *Lygus lineolaris* du Québec



(ASP-09-10). Cette étude a démontré qu'une partie de la variation du comportement d'exploration de ce ravageur a une base génétique (variance additive génétique) faible mais présente, en établissant un pedigree en laboratoire. Pour simplifier, en établissant des modèles statistiques aussi appelés « modèle animal mixte » [28,29], il est possible de décomposer la variance phénotypique observée dans la population en variance génétique. En connaissant les arbres de famille (pedigree), on s'attend à ce que les membres d'une même famille soient plus semblables que ceux d'une autre famille. Ainsi, les descendants d'une famille sont plus similaires dans leur phénotype (ici le comportement d'exploration) que des demi-frères et des demi-sœurs et encore plus différents d'individus sans connexion familiale. Basé sur ce principe, on peut alors estimer les différences entre familles comme étant la base génétique associée au caractère étudié [30,31]. L'un des avantages de la génétique quantitative est qu'il n'est pas nécessaire de séquencer le génome pour mettre en évidence la composante génétique d'un phénotype. Comme les caractères n'évoluent pas seuls, mais partagent des gènes en commun, il n'est pas rare que les changements évolutifs d'un caractère altèrent celui d'un autre [32,33]. Il est donc nécessaire de mesurer différents caractères simultanément pour mieux comprendre leur évolution dans son ensemble [32]. En plus de mesurer le comportement d'exploration, nous avons aussi mesuré la masse corporelle. Chez les insectes, la masse corporelle est un trait fondamental qui varie considérablement entre les espèces, reflétant l'évolutivité de ce trait [34–36]. De plus, la masse, qui est souvent associée aux traits d'histoire de vie [37–40], représente une composante essentielle de la physiologie énergétique [41,42], mais est également associée au comportement. De plus, chez les insectes, la masse ainsi que la taille varient fortement entre les sexes avec la présence d'un dimorphisme sexuel [43–45]. Ainsi pour mieux comprendre l'évolution du comportement, il est nécessaire de comprendre aussi l'évolution de la masse mais également les différences entre les sexes étant donné l'importance du dimorphisme sexuel chez les insectes. Il est possible de fragmenter une population en groupes tel que les mâles et les femelles, et étudier les possible association génétiques [46]. Ces associations génétiques entre les sexes permet ainsi de mieux comprendre la dynamique évolutive entre les sexes et comment un dimorphisme sexuel peut s'établir dans une population [46,47]. Grâce à ces informations génétiques, nous sommes en mesure de pouvoir prédire la réponse à l'évolution de ses caractères. Cependant, une pièce du puzzle évolutif est toujours manquante, il s'agit des gradients de sélection.

L'objectif de cette étude est de prédire la réponse à la sélection du comportement d'exploration d'une population de la punaise terne *Lygus lineolaris*. Nous avons donc simulé différents scénarios d'évolution (différent gradient de sélection). Pour la population générale en se basant sur l'équation 1 (Méthode), nous avons simulé 1) un scénario où la sélection ( $\beta$ ) varie dans son intensité sur un trait mais pas sur l'autre (et inversement) ; 2) un scénario où les deux gradients de sélection varient, créant ainsi des scénarios où la sélection est en concordance entre les traits (négative ou positive) et un scénario où la sélection est antagoniste entre les traits. Pour mieux comprendre l'évolution entre les femelles et les mâles et en se basant sur l'équation 2 (Méthode), nous avons simulé 3) un scénario où la sélection varie pour un sexe mais pas pour l'autre et uniquement pour le comportement d'exploration, 4) un scénario où la sélection varie pour les deux sexes, créant ainsi un scénario où la sélection est concordante entre les sexes et un scénario où la sélection est antagoniste entre les sexes.

## Méthodes

### Étude de génétique quantitative et matrices génétiques.

Au cours de l'été 2021, une population de punaises ternes sauvages a été capturée sur six sites différents à travers la région de Mirabel (Laurentides, Québec). Après deux générations en laboratoire, des mâles et femelles vierges ont été isolés et placés ensemble pour produire le pedigree. Au total, 305 familles ont été produites avec 1148 descendants phénotypés pour leur comportement d'exploration et leur masse corporelle à travers 64 blocs de mesure entre l'automne 2021 et le printemps 2022. Chaque descendant a été phénotypé pour leur comportement d'exploration : distance totale parcourue pendant 10 minutes dans une arène carrée standardisée dite « *Openfield* » de 15 cm de long ainsi que pour leur masse corporelle humide. Ces mesures de comportement d'exploration en laboratoire sont conventionnelles et souvent appliquées autant pour des insectes que des mammifères ou des oiseaux [48,49].

Pour estimer la matrice génétique, nous avons utilisé un modèle multivarié mixte animal [29] à l'aide du programme R [50] et de la librairie *brms* [51]. Ce modèle incorpore l'information du pedigree dans le modèle statistique afin de décomposer la variance phénotypique en variance génétique. De plus, ce modèle estime également la covariance génétique entre le comportement d'exploration et la masse corporelle pour produire la matrice  $\mathbf{G}$  (fig. 1A). Pour intégrer les différences entre les femelles et les mâles, un deuxième modèle a été produit qui fragmente plus finement la matrice  $\mathbf{G}$  en matrice sexe-spécifique  $\mathbf{G}_{fm}$  (fig. 1B).



Figure 1. A) Matrice  $\mathbf{G}$  (2x2) de la variance et covariance génétiques globale. La diagonale représente la variance génétique associée à la masse corporelle (Masse) et au comportement d'exploration comme distance totale parcourue (Distance). Le reste de la matrice représente les covariances génétiques. B) Matrice sexe-spécifique  $\mathbf{G}_{fm}$  (4x4) de la variance et covariance génétique. L'acronyme « F. » correspond pour femelle, alors que celui de « M. » est pour mâles.

### Équation d'évolution

Pour prédire l'évolution d'un trait, il est nécessaire de posséder l'information génétique ainsi que les pressions de sélection du trait. Grâce à l'étude de génétique quantitative, nous avons accès à la matrice génétique de variance-covariance (information génétique, aussi appelé « matrice  $\mathbf{G}$  ») du comportement d'exploration ainsi que de la masse corporelle de cette population. De plus, cette matrice génétique a été fragmentée entre les sexes (aussi appelé « matrice  $\mathbf{G}_{fm}$  ») permettant de prédire l'évolution de chaque sexe. Avec la matrice  $\mathbf{G}$ , on peut simuler différents vecteurs de sélection (ou scénarios évolutifs) pour obtenir la réponse à la sélection du comportement d'exploration et de la masse. Cette réponse à la sélection ( $\Delta Z$ ) est obtenue par la multiplication de la matrice  $\mathbf{G}$  et du vecteur de sélection tel qu'établi par Lande [32] en développant une version multivariée de la « breeder equation » :

$$\Delta Z = \mathbf{G} \cdot \beta \quad (1a)$$

Pour mieux comprendre l'équation 1a, nous l'avons développé pour montrer la réponse à la sélection de deux traits  $Z_1$  et  $Z_2$ .

$$\begin{bmatrix} \Delta_{z_1} \\ \Delta_{z_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{az_1} & cov_{a(z_1-z_2)} \\ cov_{a(z_1-z_2)} & v_{az_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_{z_1} \\ \beta_{z_2} \end{bmatrix} \quad (1b)$$

$V_a$  et  $Cov_a$  représente la variance et la covariance génétique et  $\beta$  représente les gradients de sélection appliqués à chaque trait ( $Z_1$  et  $Z_2$ ).

Pour intégrer l'information génétique entre les sexes ou la matrice  $\mathbf{G}_{fm}$  dans la réponse à la sélection, l'équation 1 (a et b) peuvent être développée plus finement [46].

$$\Delta Z = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{G}_{fm} \cdot \beta \quad (2)$$

Un des avantages de l'étude de génétique quantitative qui nous informe sur les matrices génétiques est qu'elle a été réalisée en utilisant une approche bayésienne [52,53]. Ainsi, les matrices génétiques conservent une incertitude autour de leurs points d'estimation permettant de conserver une incertitude dans la réponse à la sélection.



L'objectif de cette étude est de prédire la réponse à la sélection du comportement d'exploration et de la masse grâce à des simulations de gradients de sélection linéaire directionnelle ( $\beta$ ). Cependant, aucun gradient de sélection non-linéaire ( $\gamma$ ) n'a été simulé. Ce type de sélection n'affecte pas la moyenne d'un trait, mais sa variance en l'augmentant avec une sélection dite disruptive ou en la diminuant avec une sélection stabilisante. Il est également possible de simuler une sélection corrélacionnelle où la sélection cible une ou plusieurs combinaisons particulières du comportement et de la masse. En raison de la nature de la sélection non-linéaire, nous préférons simuler uniquement la sélection linéaire pour prédire l'augmentation maximale de ces traits et ainsi fournir le scénario maximal de l'évolution du comportement et d'une possible résistance comportementale au producteur.

#### Scénario évolutif pour la population globale

L'équation 1 (a ou b) quantifie la réponse à la sélection au niveau populationnel. Différents scénarios d'évolution sont simulés avec différents vecteurs de sélection  $\beta$ . Un premier scénario (Sc\_1a) a été produit en fixant le gradient de sélection  $\beta$  de la masse à 0 et en variant celui du comportement d'exploration entre -1 et 1 avec une incrémentation graduelle de 0.01. Cet éventail de gradient de sélection correspond à la variation retrouvée dans l'une des principales méta-analyses sur les gradients de sélection [54]. Un deuxième scénario (Sc\_1b) est également simulé avec la situation inversée où la sélection varie pour la masse mais reste fixe pour le comportement. Un troisième et dernier scénario (Sc\_2) est simulé où les deux gradients de sélection varient de -1 à 1 avec une incrémentation de 0.05 (pour réduire le temps de calcul). Ainsi la sélection peut être concordante quand les vecteurs vont dans la même direction et elle peut être antagoniste quand les vecteurs ont des directions opposées (fig. 4a). Pour montrer l'effet de la covariance génétique sur la réponse à la sélection, des simulations similaires sont effectuées mais avec une matrice  $G$  où la covariance est fixée à 0.

#### Scénario évolutif entre les sexes

L'équation 2 prédit l'évolution des femelles et des mâles au sein d'une population. Différents scénarios d'évolution sont simulés. Un premier scénario (Sc\_3a) où les gradients de sélection pour la masse et pour les mâles sont fixes, alors que le gradient de sélection pour le comportement des femelles varient entre -1 et 1 avec une incrémentation de 0.01. Un deuxième scénario (Sc\_3b) est simulé mais avec une sélection sur le comportement des mâles qui varie entre -1 et 1. Un dernier scénario (Sc\_4) a été produit où les gradients de sélection des mâles et femelles sur le comportement varient de -1 à 1 avec une incrémentation de 0.05. Ainsi, la sélection entre les sexes peut être concordante ou antagoniste. Une sélection antagoniste entre les sexes représente un scénario où il y a un conflit sexuel [47]. Pour montrer l'effet de la covariance génétique entre les sexes sur la réponse à la sélection, des simulations similaires sont effectuées mais avec une matrice  $G_{fm}$  ou l'intégralité de la matrice génétique entre les sexes est fixée à 0.

#### Résultats des simulations

##### Scénario évolutif pour la population globale

Le premier scénario (Sc\_1a) fait varier le gradient de sélection ( $\beta$ ) du comportement de -1 à 1. La réponse maximale du comportement est de 0,077 écart-type avec un intervalle de crédibilité de [0,001 ; 0,226], ce qui correspond à un changement de 1,053 cm de distance explorée en 10 minutes (figure 2). La sélection sur le comportement a un effet indirect sur la masse corporelle avec une modification de celle-ci au maximum de 32,016  $\mu\text{g}$  (figure 2). Cet effet indirect est la résultant de la covariance génétique entre les deux caractères (figure 1). Le deuxième scénario (Sc\_1a) avec une variation du gradient de sélection sur la masse montre un changement de la masse au maximum de 140,459  $\mu\text{g}$ , et un effet indirect sur le comportement de 1,002 cm (figure 2). Cependant, ses résultats sont à prendre avec précaution, car l'incertitude de la réponse à la sélection, surtout la réponse indirecte, est souvent accompagnée d'une large incertitude qui chevauche zéro, 0,031 [-0,094 ; 0,009] et 0,031 [-0,094 ; 0,009] pour Sc\_1a et Sc\_1b respectivement. Si l'on fixe la covariance génétique à 0, alors toutes les réponses indirectes se fixent à 0, démontrant bien l'effet de cette covariance sur l'évolution des caractères.

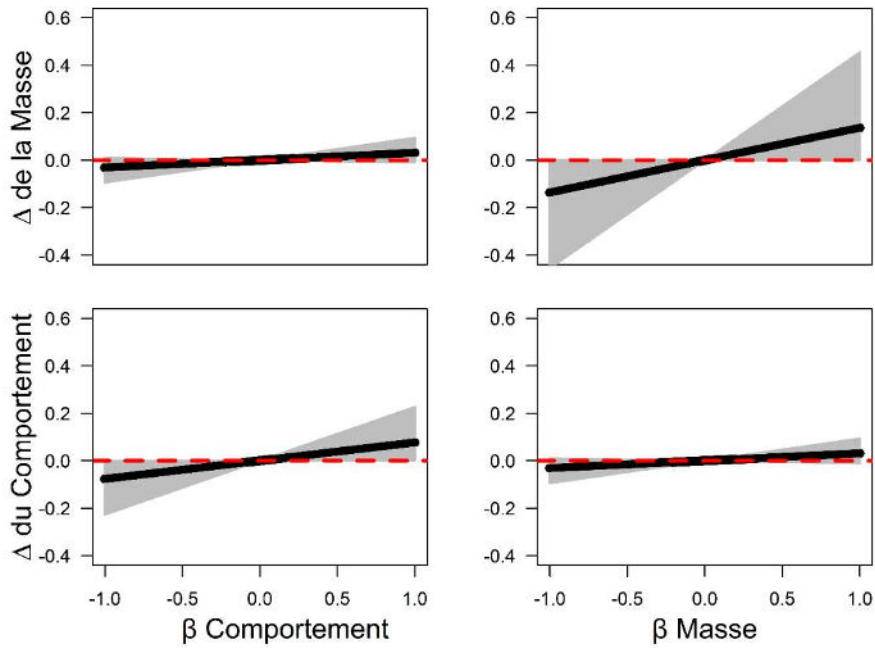


Figure 2. Réponse à la sélection ( $\Delta$ ) du comportement (panel du bas) et de la masse (panel du haut) des scénarios 1a où la sélection  $\beta$  varie pour le comportement (panel de gauche) et scénario 1b où la sélection  $\beta$  varie pour la masse (panel de droite). Les estimations de la réponse à la sélection ( $\Delta$ ) sont représentées par la ligne noire avec leur intervalle de crédibilité entre 2,5% et 97,5% en gris. La ligne rouge en pointillée représente une réponse à la sélection de 0.

Avec le scénario (Sc\_2) où les deux gradients de sélection varient, la réponse maximale à la sélection de la masse et du comportement est plus importante ( $> 0,10$  écart type de réponse) dans le cas où les sélections sont concordantes (même signe ou direction de sélection) démontrant un effet synergique des forces de sélection (figure 3). Au contraire, dans les cas de sélection antagoniste (différent signe ou direction de sélection), la réponse est ralentie, voir reste nulle (figure 3) avec un gradient de sélection sur la masse inférieur à 0,5 malgré une sélection proche de 1 pour le comportement ainsi qu'un gradient de sélection sur le comportement inférieur à 0,25 malgré une sélection proche de 1 pour la masse.

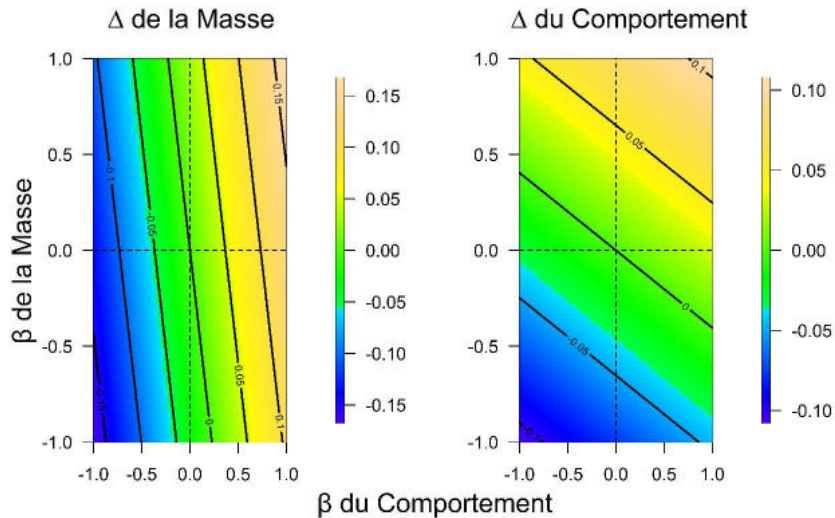


Figure 3. Surface de la réponse à la sélection ( $\Delta$ ) de la masse (panel de gauche) et du comportement (panel de droite) en fonction des variations des gradients de sélection ( $\beta$ ). Les estimations de la réponse de chaque trait ( $\Delta$ ) sont représentées par un gradient de couleur de bleu (négatif) à jaune (positive) avec la couleur verte représentant les réponses proches de 0.



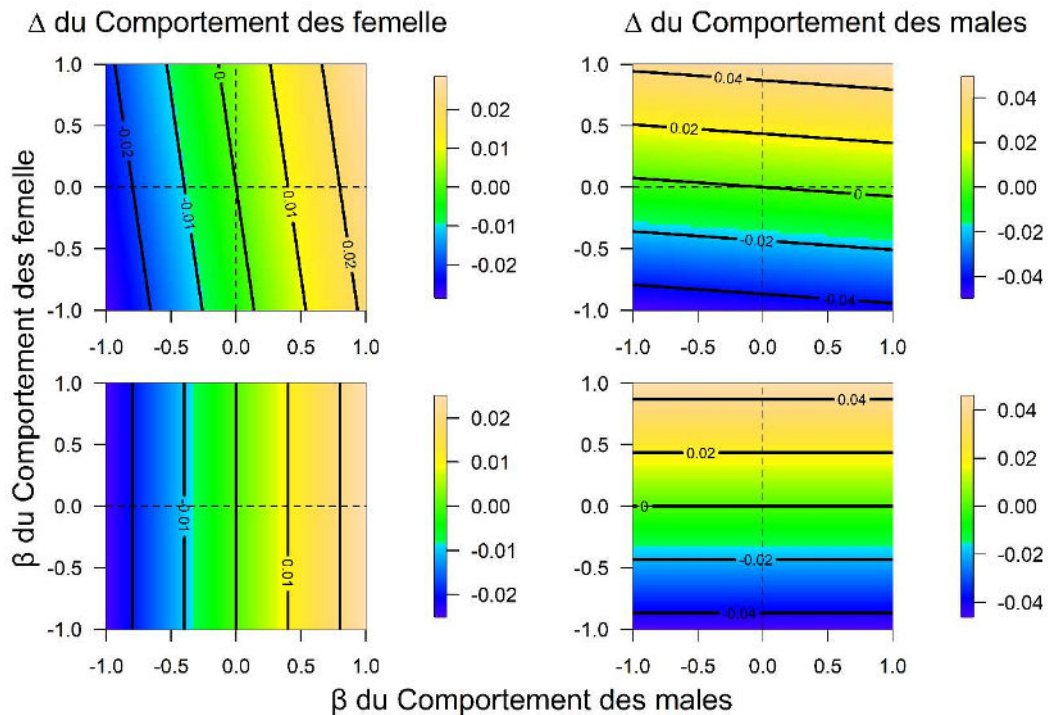
### Scénarios évolutifs entre les sexes

Le premier scénario (Sc\_3a) fait varier le gradient de sélection ( $\beta$ ) sur le comportement uniquement chez les femelles de -1 à 1. La réponse maximale du comportement féminin est de 0,025 d'écart-type avec un intervalle de crédibilité de [0,001; 0,097], ce qui correspond à un changement de 1,016 cm de distance explorée en 10 minutes. Un effet indirect est aussi observé sur le comportement masculin (changement de 1,002 cm), sur la masse féminine (changement de 8,986  $\mu\text{g}$ ) et sur la masse masculine (changement de 2,397  $\mu\text{g}$ ). Cet effet indirect est la résultant des covariances génétiques entre les traits, mais aussi entre les sexes.

Dans le scénario (Sc\_3b) où la sélection varie pour le comportement uniquement chez les mâles, la réponse à la sélection maximale imposera un changement de 1,032 cm dans la distance d'exploration, avec des effets indirects sur le comportement féminin (changement maximum de 1,002 cm), sur la la masse masculine (changement maximum de 3,197  $\mu\text{g}$ ) et sur la masse féminine (changement maximum de 0,191  $\mu\text{g}$ ). De même, ses résultats sont à prendre avec précaution, car l'incertitude de la réponse indirecte est souvent accompagnée d'une large incertitude qui chevauche zéro.

Avec la simulation 4 (Sc\_4) où la sélection sur le comportement chez les femelles et les mâles varient, les scénarios de sélection de concordance ou antagoniste n'ont que peu d'influence sur la réponse à la sélection. Les résultats sont similaires à ceux des simulations (Sc\_3) où un seul sexe est sélectionné. De plus, on remarque peu de différence dans la réponse à la sélection de chaque sexe quand les covariances génétiques entre les sexes sont fixées à 0 (figure 4).

Figure 4. Surface de la réponse à la sélection du comportement ( $\Delta$ ) des femelles (panel de gauche) et du



comportement des mâles (panel de droite) en fonction des différents gradients de sélection ( $\beta$ ) entre les sexes (scénario 4, Sc\_4). Le panel du haut représente la réponse avec l'intégralité de la matrice  $\mathbf{G}_{fm}$ , celui du bas avec une matrice où les covariances entre les sexes sont fixées à 0. Les estimations de la réponse de chaque caractère ( $\Delta$ ) sont représentées par un gradient de couleur de bleu (réponse négative) à jaune (réponse positive) et verte (réponse proche de 0).





## Discussion

L'objectif de cette étude est de simuler la réponse à la sélection du comportement d'exploration et de la masse du ravageur *L. lineolaris*, en s'appuyant sur les équations d'évolution et sur la matrice génétique obtenue dans une étude précédente [31,32,46]. Ces simulations apportent des résultats importants dont une réponse directe sur le comportement où la masse va changer le caractère (augmenter ou diminuer dépendamment du signe de la sélection) de seulement 1 cm de distance explorée et de 140 ug de poids à leur maximum pour des gradients de sélection extrême, reflétant le faible potentiel évolutif du comportement. Si les deux traits sont sélectionnés alors cette réponse est bien plus important due à la synergie entre les forces de sélection. Cependant, nous remarquons que dans le cas où les gradients sont antagonistes, les caractères n'évolueront pas si la force de sélection est moins de 0,5 sd pour la masse et 0,25 sd pour le comportement. Finalement, en dissociant les gradients de sélection entre les mâles et les femelles, des réponses indirectes sont observées de la même grandeur que les premiers scénarios sur la population globale.

Dans nos simulations, nous observons que la réactivité du comportement est plus faible que celle de la masse en partie dû à la faible variance génétique du comportement. Cependant, en présence d'un gradient de sélection extrêmement fort ( $\sim -1$  ou  $1$ ), le comportement répond à la sélection dans une certaine mesure. On peut émettre l'hypothèse que si les producteurs induisent des gradients de sélection fort via leurs méthodes de lutte, les populations de punaises devraient altérer leur comportement d'exploration à travers les années. Les punaises exploreront potentiellement plus, endommageront plus de récolte, mais aussi échapperont plus facilement aux agents de sélection imposés par les producteurs. Pour prédire plus précisément le temps pour que ces changements évolutifs produisent des résistances comportementales, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour estimer précisément d'une part les gradients de sélections sur le comportement et leur stabilité à travers les années, et d'autre part la distance de mobilité minimale d'une punaise pour échapper ou exténuer les effets toxiques des insecticides dans un champ.

De plus, nous observons qu'un changement de la masse va s'accompagner d'un changement du comportement due à la covariance positive entre ses caractères. Cependant, dans le cas de sélection antagoniste entre la masse et le comportement, on remarque que la réponse à la sélection du comportement peut être annulée. Cette information peut être un avantage pour les producteurs. Ainsi, en induisant une sélection négative sur la masse des punaises, les producteurs peuvent dans une certaine mesure arrêter l'augmentation du comportement d'exploration et l'apparition de résistance comportementale chez ce ravageur. Pour induire une sélection négative sur la masse, il peut être conseiller aux producteurs d'utiliser des prédateurs (en général, les prédateurs ciblent les proies les plus nutritives donc les plus grosses), ou alors utiliser des pièges construits pour capturer en priorité les punaises les plus grosses.

Finalement, nous observons une réponse indirecte d'un sexe sur l'autre sur le comportement, malgré la faible covariance génétique entre les sexes. Cependant, si l'on applique une sélection concordante ou antagoniste entre les sexes, la réponse à la sélection du comportement ne semble pas changer. Ce résultat démontre la possible dissociation évolutive du comportement entre les sexes, si la sélection est antagoniste entre les sexes, alors les caractères continuent à évoluer sans aucune contrainte. Ce résultat peut être problématique, car si les sexes peuvent facilement dissocier l'évolution de leur comportement d'exploration alors ils peuvent développer des résistances comportementales différentes. Les méthodes de lutte et de régulation de ce ravageur seront alors complexifiées et demanderont aux producteurs de développer des méthodes spécifiques pour chaque sexe.

Pour conclure, le manque d'estimation des gradients de sélection imposé par les pratiques de lutte aux populations de ravageur ne permet pas de pouvoir prédire précisément l'évolution de ces traits pour la punaise terne. Ainsi, la prochaine étape de cette étude consisterait à estimer ces gradients de sélection. Pour cela deux méthodes sont possibles : soit une étude en laboratoire de la relation phénotypique de ses traits et du fitness avec et sans les agents utilisés dans les pratiques de contrôle ; soit un suivi temporel avec plusieurs années de mesure des traits d'une population locale et sédentaire de punaise terne dans les champs de fraises. Cette deuxième méthode est presque impossible, car n'avons pas encore assez



d'informations sur la mobilité des populations de punaise terne à travers la région de Mirabel. Seules quelques études ont commencé à évaluer leur mobilité en vol soit à 12 km en 12h [55] ou encore entre 22 et 72 m<sup>2</sup> par jour [56], ce qui rend cette espèce peu sédentaire.

## Effet d'un insecticide pyréthriné sur le comportement d'exploration de la punaise terne *Lygus lineolaris*

Laura Chouinard-Thuly, Mathieu Videlier, François Dumont & Pierre-Olivier Montiglio

### Résumé

La punaise terne est un important ravageur des fraisiers du Québec, mais aussi d'autres cultures à travers l'Amérique du Nord. Pour réguler et lutter contre ce ravageur, les producteurs utilisent majoritairement des insecticides dans leurs champs. Des résistances physiologiques, mais aussi comportementales ont cependant été détectées chez la punaise terne face aux insecticides. Pour mieux prédire l'apparition et l'évolution de ses résistances comportementale, il est essentiel d'estimer les forces de sélection induites par les insecticides. Étonnamment, cette information est assez rare surtout chez la punaise terne. L'objectif de cette étude est d'estimer les forces de sélection induites par un insecticide dans des mésocosmes en laboratoire sur le comportement d'activité et de témérité des punaises ternes. Dans notre test, aucun gradient induit par l'insecticide n'a été détecté sur le comportement. Cependant, le comportement semble être sélectionné différemment entre les sexes, avec une sélection directionnelle sur la témérité et non-linéaire sur l'activité pour les mâles et absent chez les femelles. De plus, dans la population survivante, les scores de répétabilité du comportement sont faibles voire nulle et aucun comportement d'évitement ne semble être détecté dans nos tests.

### Introduction

Les pratiques agricoles modernes utilisent des insecticides à large spectre pour contrôler, voire éradiquer, les populations de ravageurs [57,58]. Malgré une efficacité à court terme, leur effet à long terme est souvent contrebalancé par l'apparition de lignées résistantes de ravageurs aux différents produits [10,11,59,60]. L'apparition de ces lignées résistantes prouve que des mécanismes évolutifs sont exercés par l'utilisation des insecticides dans les champs. Pour lutter contre cette résistance, il est conseillé d'alterner les d'insecticides, mais aussi d'espacer leur utilisation. Ces nouvelles pratiques cherchent ainsi à maintenir la susceptibilité des individus aux insecticides afin que les populations de ravageurs continuent de répondre aux traitements [61–63]. Cependant, on connaît encore mal l'intensité des effets de sélection imposée par les insecticides. La résistance d'un ravageur peut être influencée par ses caractéristiques biologiques mais aussi écologiques [64], son stade de développement ainsi que par le type de pratiques agricoles utilisé [65]. L'apparition de résistance aux insecticides peut être physiologique, comme la détoxification métabolique des composés toxiques [66], mais aussi comportementale, lorsqu'un individu réduit de lui-même son exposition aux composés toxiques [17,18].

Plusieurs études ont d'ailleurs démontré le développement de lignées résistantes aux d'insecticides via des changements physiologiques [12–15] et comportementaux (évitement des zones traitées avec un insecticide [16]) chez la punaise terne *Lygus lineolaris* [1], un ravageur important des fraises du Québec et des productions de coton et de fruits aux États-Unis. Cependant, les forces évolutives qui influencent ce ravageur sont encore méconnues. En l'absence de connaissances sur l'effet sélectif des insecticides, les producteurs peuvent difficilement intégrer cet aspect dans le choix des méthodes à utiliser pour mieux contrôler les populations de punaises ternes. Ainsi, une meilleure compréhension de ces forces permettra de manipuler avantageusement l'évolution des populations locales de ce ravageur. En pratique, les producteurs pourront ajuster leur approche en préférant une méthode de lutte plutôt qu'une autre, en alternant certaines méthodes, en choisissant des moments ou des façons d'utiliser les méthodes de lutte en se basant sur les connaissances acquises sur la sélection induite par les insecticides.

Pour mesurer la sélection induite par les insecticides, il est nécessaire de mesurer la valeur adaptative (ou fitness) des individus dans la population. La sélection est représentée par la relation phénotypique entre



la valeur adaptative et le caractère d'intérêt [31,54]. La valeur adaptative est composée la longévité ou la capacité de survie dans un environnement, le succès reproducteur, ainsi que la fertilité [54]. Pour *L. lineolaris*, la composante déterminante de valeur adaptative face aux insecticides est la capacité de survie après exposition. Mesurer la sélection peut s'avérer difficile, car elle nécessite la collecte d'une large base de données pour balancer la large variabilité de la valeur adaptative [31]. De plus, il est important de mesurer différents caractères d'intérêt, car la sélection peut s'appliquer de façon indirecte sur ces caractères s'ils covarient entre eux [32]. Ainsi on peut dissocier le différentiel de sélection, représenté par la force de sélection globale sur le caractère, et le gradient de sélection, qui est la force de sélection directe sur le caractère [32,33]. La sélection peut être directionnelle avec des gradients de sélection linéaire ( $\beta$ ) significative où la moyenne du caractère changera avec la sélection ; mais la sélection peut aussi être disruptive ou stabilisante avec gradient de sélection non-linéaire ( $\gamma$ ) significative où la variance et non la moyenne du caractère changera avec la sélection.

L'objectif de cette étude est d'estimer les gradients de sélection linéaire ( $\beta$ ) et non-linéaire ( $\gamma$ ) sur deux comportements essentiels liés à l'exploration : l'activité et la témérité de la punaise terne en laboratoire avec l'utilisation de mésocosme avec ou sans insecticides.

## Méthodes

### Collecte et Maintenance de la population de punaise terne

Durant l'été 2020, nous avons capturé des punaises ternes sauvages dans la région de Mirabel (45°38'57.4"N 74°05'30.6"W, Bas-Laurentides, Québec, Canada). Nous avons maintenu cette population dans les locaux de l'Université du Québec à Montréal. Les adultes ont été placés dans un pot en plastique cylindrique (950 ml) avec un morceau de papier comme refuge et de laitue comme substrat de nourriture, de reproduction et de ponte. Ces pots ont été conservés en tente hydroponique à une température constante (~ 22 °C) et humidité relative constante (~ 50 %) avec un cycle de lumière de 16 heures, similaire au cycle estival de la région de Mirabel. Deux fois par semaine, la laitue a été remplacée et les pots ont été nettoyés si nécessaire. Les laitues des pots d'adultes ont été isolées pour laisser émerger la nouvelle génération de punaises ternes en laboratoire. En général, le temps de développement d'œuf à adulte reproducteur est d'environ un mois.

### Protocole expérimental

Avant le test comportemental et le test sur l'effet de l'insecticide sur le comportement en mésocosme, les individus ont été isolés dans un tube d'Eppendorf. Le comportement a été mesuré pour chaque individu, puis chaque individu a été marqué avec différentes couleurs de peinture acrylique. Le lendemain, des groupes de 20 individus ont été placés en serre dans une cage contenant deux plants de fraises taillées et de la laitue. La moitié des cages ont été traitées avec 50 ml de H<sub>2</sub>O (représentant un traitement contrôle), alors que l'autre moitié des cages ont été traitées avec 50 ml de l'insecticide cyperméthrine (950 µl H<sub>2</sub>O avec 50 µl d'insecticide). Après trois jours dans la serre, les individus ont été recueillis, et leur survie a été mesurée. Le comportement d'exploration des individus survivants a été mesuré une deuxième fois et un test comportemental supplémentaire d'évitement a été effectué.

Au total, 229 individus (123 femelles et 106 mâles) ont été échantillonnés dont 146 ayant subi une seconde mesure d'exploration. De ces 229 individus, 120 ont été soumis au traitement témoin et 109 ont été exposés à l'insecticide.

### Test comportemental

Chaque individu a été mesuré pour son comportement au sein d'une arène dite « *openfield* » vide carrée (15cm x 15cm) placée sur un papier possédant un quadrillé de 3.75 cm. Les openfield sont des outils conventionnels et standardisés de mesure du comportement des animaux [48,49]. Chaque individu a ensuite été placé délicatement dans l'arène, puis observé pendant 5 minutes. L'observateur a compté le nombre de fois que l'individu a traversé un carré central ou périphérique. L'activité est mesurée par le nombre de carrés traversés, alors que la témérité est calculée comme la proportion de carrés centraux traversés comparés aux carrés totaux parcourus (centraux et extérieurs).



À la suite du deuxième test de comportement (uniquement pour les survivants du mésocosme), un test complémentaire d'évitement a été effectué. Ce test est un test altéré du test « *openfield* ». L'individu est placé délicatement au centre de l'arène dont une moitié du couvercle a été peinte avec de l'insecticide et l'autre moitié avec de l'eau. La mobilité a été observée pendant 5 minutes. L'évitement de l'insecticide a été mesuré comme la proportion de carrés traversés du côté du couvercle sans insecticide comparés aux carrés totaux parcourus (avec ou sans insecticide).

#### Analyse statistique

L'analyse statistique a été réalisée en trois étapes : l'estimation des gradients de sélection sur le comportement des punaises ternes, l'estimation du score de répétabilité des comportements des punaises ternes survivantes, et l'estimation de la capacité des punaises ternes à éviter l'insecticide. Pour l'ensemble de l'analyse statistique, les deux variables de comportement ont été transformées pour les rendre plus gaussiennes (log transformé pour l'activité et arcsine square root transformé pour la témérité), puis elles ont été centrées et réduites pour les standardiser avec une moyenne de 0 et variance de 1. L'avantage de cette transformation est d'obtenir des gradients de sélection standardisés, donc comparables.

Pour estimer les gradients de sélection, une méthode classique d'analyse de Lande et Arnold [32] a été effectuée. Les gradients de sélection ont été estimés comme la covariance entre la valeur adaptative (ici la survie) et les variables de comportement standardisées via un modèle linéaire généralisé avec comme variable réponse la survie dans les cages en serre avec une distribution binomiale (0 - mort, 1 - survie). Pour estimer les gradients de sélection linéaire ( $\beta$ ), le modèle possède comme effets fixes : l'identité sexuelle des individus, le traitement subi par les individus et les variables comportementales standardisées. Pour estimer les gradients de sélection non-linéaire ( $\gamma$ ), nous avons ajouté au modèle comme effets fixes les variables comportementales quadratiques et leur interaction [32]. Les gradients non-linéaires ( $\gamma$ ) sont doubles comme conseillé par Stinchcombe [67]. Une approche par étape nous a permis d'identifier le meilleur modèle et d'évaluer la présence ou non de gradients de sélection linéaire ( $\beta$ ), ou non-linéaire ( $\gamma$ ) dans la population ou entre les sexes et les traitements (tableau 1 A).

Pour estimer la répétabilité du comportement d'activité et de témérité, nous avons utilisé des modèles mixtes univariés avec comme effets fixes : l'ordre des tests de comportement, l'identité sexuelle des individus, le traitement subi par les individus et l'interaction entre sexe et traitement, ainsi que comme effets aléatoires : l'identité des individus et le bloc de mesure. Le package *rpt* est utilisé pour calculer le score de répétabilité, mais aussi son incertitude avec 1000 itérations [68].

Pour étudier le comportement d'évitement des insecticides, un simple t-test entre l'activité totale (nombre de carrés traversés) de la zone traitée aux insecticides et celle traitée à l'eau a été effectué. L'activité est calculée selon un log transformé pour obtenir une distribution gaussienne.

#### Résultats

##### Sélection par l'insecticide

Au niveau populationnel, aucune sélection linéaire ou non-linéaire sur l'activité ou la témérité n'est détectée (tableau 1. B). Cependant, nous détectons une légère différence entre les gradients de sélection linéaire ( $\beta$ ) entre les sexes (modèle 3 vs 1 :  $X^2$  de 5,727 où  $p = 0,057$ ), cet effet est plus fort pour les gradients de sélection non-linéaire ( $\gamma$ ) (modèle 4 vs 2 :  $X^2$  de 15,312 où  $p = 0,018$ ). Chez les mâles, les gradients de sélection sont significatifs avec une sélection disruptive pour l'activité (avec une survie plus forte pour les individus avec une activité faible ou forte) et une sélection plus linéaire et positive pour la témérité (avec une survie plus forte pour les individus avec une forte témérité) (tableau 1 C, Fig. 1). Alors que chez les femelles, les gradients linéaires ou non-linéaires sont non significatifs et neutres (tableau 1 C, figure 1). Nous ne détectons aucune différence entre les gradients de sélection du traitement témoin et ceux du traitement avec le pesticide malgré une légère différence de moyenne de survie (témoin : 0,700 avec un écart-type de 0,460 et pesticide : 0,569 avec un écart-type de 0,498).



Tableau 1. (A) Description de chaque régression linéaire généralisée pour évaluer la présence de sélection linéaire et non-linéaire sur les caractères d'activité et de témérité. Le modèle 1 est comparé au modèle Nul (0) pour évaluer si l'on détecte de la sélection linéaire dans la population. Les modèles 1 et 2 sont comparés pour évaluer la présence de sélection non-linéaire dans la population associée aux termes quadratiques/corrélacionnels des caractères comportementaux. Les modèles 3 et 4 évaluent si la sélection (linéaire ou non-linéaire) diffère entre les sexes. Les modèles 5 et 6 évaluent si la sélection (linéaire ou non-linéaire) diffère entre les traitements (témoin ou insecticide). Les modèles 7 et 8 évaluent si la sélection diffère entre les sexes et les traitements. (B) Résultats des comparaisons des modèles. (C) Tableau des gradients de sélection linéaire ( $\beta$ ) et non-linéaire ( $\gamma$ ) de l'activité et de la témérité au niveau populationnel et entre les sexes.

A)	Glmer (distribution Binomial)
Model 0	Survie~ sexe + traitement + (1 TEST)
Model 1	Survie ~ sexe + traitement + caractère(s) + (1 TEST)
Model 2	Survival~ sexe + traitement + caractère(s) + quadratique/corrélacionnelle caractère(s) + (1 TEST)
Model 3	Survie ~ sexe + traitement + caractère(s) * sexe + (1 TEST)
Model 4	Survie ~ sexe + traitements +( caractère(s) +quadratique/corrélacionnelle caractère(s)) * sexe + (1 TEST)
Model 5	Survie ~ sexe + traitement + caractère(s) * traitement + (1 TEST)
Model 6	Survie ~ sexe + traitement +( caractère(s) + quadratique/corrélacionnelle caractère(s)) * traitement + (1 TEST)
Model 7	Survie ~ sexe + traitement + caractère(s) * sexe : traitement + (1 TEST)
Model 8	Survie ~ sexe + traitement +( caractère(s) + quadratique/corrélacionnelle caractère(s)) * sexe : traitement + (1 TEST)

B)		LogLik	Chisq	P values
Linéaire?	1 vs 0	-144,960	2,211	0,331
Non-linéaire?	2 vs 1	-140,142	9,636	0,022
Sexe Linéaire?	3 vs 1	-142,096	5,727	0,057
<b>Sexe non-linéaire?</b>	<b>4 vs 2</b>	<b>-134,440</b>	<b>15,312</b>	<b>0,018</b>
Traitement Linéaire?	5 vs 1	-144,489	0,942	0,624
Traitement non-linéaire?	6 vs 2	-138,881	11,216	0,082
Sexe: Traitement Linéaire?	7 vs 1	-141,119	7,682	0,262
Sexe: Traitement non-linéaire?	8 vs 2	-130,672	27,634	0,049

C) Caractère	Population	$\beta$	SE	P values	$\gamma$	SE	P values
Témérité	Globale	0,551	0,383	0,150	0,291	0,193	0,131
Activité	Globale	0,227	0,169	0,178	0,000	0,124	0,997
Témérité x Activité	Globale				0,546	0,204	0,007
Témérité	Femelle	0,031	0,206	0,879	-0,002	0,108	0,993
Activité	Femelle	-0,077	0,210	0,715	0,326	0,226	0,470
Témérité x Activité	Femelle				0,435	0,224	0,331
Témérité	Male	<b>0,659</b>	<b>0,294</b>	<b>0,025</b>	0,339	0,351	0,629
Activité	Male	<b>0,703</b>	<b>0,296</b>	<b>0,017</b>	<b>3,156</b>	<b>0,532</b>	<b>0,003</b>
Témérité x Activité	Male				<b>2,685</b>	<b>0,684</b>	<b>0,050</b>

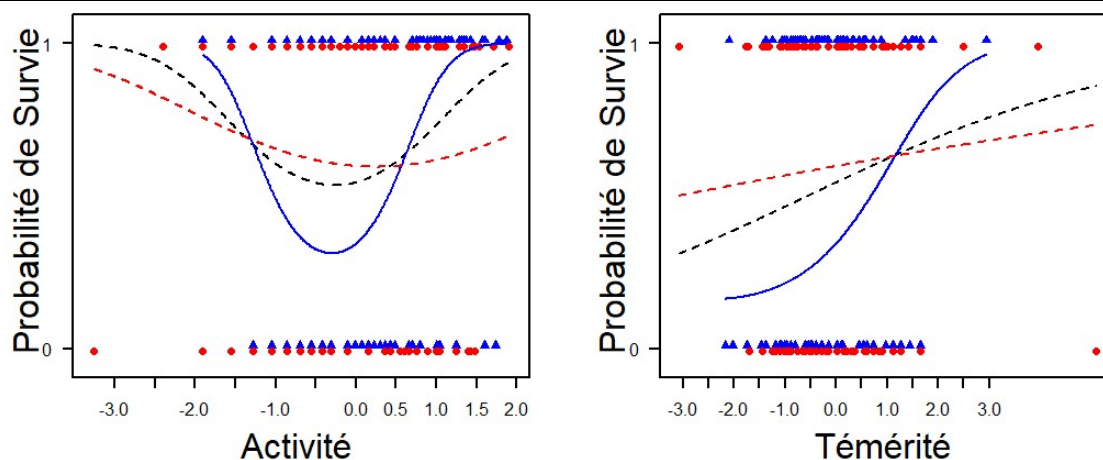


Figure 1. Gradients de sélection sur les deux variables de comportement. Le panel de gauche représente les gradients de sélection sur l'activité avec, en noir, le gradient non-linéaire populationnel, en rouge, celui des femelles, et en bleu, celui des mâles. Le panel de droite représente les gradients de sélection sur la témérité. Les gradients pointillés sont non significatifs alors que ceux en ligne pleine sont significatifs.

#### Répétabilité du comportement

La répétabilité du comportement d'activité est de 0,022 (CI : 0,000; 0,182), celui de la témérité est de 0 (CI : 0,000; 0,164). Même en fragmentant la base de données par sexe (mâles ou femelles) ou par traitement (pesticide ou contrôle), les scores de répétabilité ne varient pas. Malgré la faible variance individuelle (différence entre les individus), nous remarquons que les mâles sont plus actifs que les femelles (tableau 2, coef : 0,405 (SE : 0,167) où  $p = 0,016$ ) mais qu'ils ne sont pas plus téméraires que les femelles (tableau 2, coef : -0,105 (SE : 0,172) où  $p = 0,540$ ). De plus, les individus sont plus téméraires à la deuxième mesure (tableau 2, coef : 0,583 (SE : 0,165) où  $p = 0,002$ ) mais moins actifs lors de leur deuxième mesure (tableau 2, coef : -0,670 (SE : 0,164) où  $p < 0,001$ ).

Tableau 2. Source de variance A) de l'activité et B) de la témérité. Les valeurs en gras représentent les effets significatifs sur la variance phénotypique du comportement.

Source	Coefficient	SE	df	T values	P values
<b>(A) Activité</b>					
Intercept	0,028	0,162	32,056	0,173	0,864
<b>Sexe (male)</b>	<b>0,405</b>	<b>0,167</b>	<b>139,146</b>	<b>2,426</b>	<b>0,017</b>
<b>Ordre (2)</b>	<b>-0,670</b>	<b>0,164</b>	<b>19,888</b>	<b>-4,084</b>	<b>0,001</b>
Traitement (témoin)	0,263	0,191	34,572	1,375	0,178
Sexe: Traitement	-0,120	0,221	140,202	-0,541	0,589
<b>(B) Témérité</b>					
Intercept	-0,099	0,163	30,859	-0,609	0,547
Sexe (male)	-0,105	0,172	281,466	-0,614	0,540
<b>Ordre (2)</b>	<b>0,584</b>	<b>0,165</b>	<b>19,354</b>	<b>3,536</b>	<b>0,002</b>
Traitement (témoin)	-0,244	0,192	33,985	-1,268	0,213
Sexe: Traitement	-0,052	0,227	283,116	-0,229	0,819



## Comportement d'évitement

L'activité enregistrée dans la zone traitée avec le pesticide (moyenne de 5.833 avec un écart type de 6.420) est plus faible que celle traitée à l'eau (moyenne de 6.087 avec un écart type de 5.913) mais elle ne diffère pas significativement ( $t = -1.119$ ,  $df = 125$ ,  $p = 0.2652$ ). De plus aucune différence d'activité moyenne dans les différentes zones traitées n'a été observée pour les mâles ou les femelles ou entre les différents traitements.

## Discussion

En utilisant une arène « *openfield* » ainsi que des mésocosmes en serre, il a été possible de quantifier les gradients de sélection linéaire ( $\beta$ ) et non-linéaire ( $\gamma$ ) sur le comportement d'activité et de témérité du ravageur *Lygus lineolaris*.

Nous n'avons pas détecté de sélection significative sur aucun des comportements dans la population globale, mais une forte sélection a été détectée uniquement chez les mâles avec une sélection disruptive sur l'activité et une sélection directionnelle positive sur la témérité. Ainsi les mâles qui ont le plus survécu dans nos tests sont ceux qui étaient les plus téméraires (qui prenaient le plus de risque) mais aussi ceux les plus ou les moins actifs. Ce résultat montre que malgré une association forte des comportements au sein du syndrome comportement [69–71], -qui représente l'ensemble des associations des différents comportements dictant la personnalité des animaux- l'activité et la témérité peuvent être sélectionnés différemment. Pour que ces caractères se dissocient complètement, il faut cependant une dissociation générique pour que les deux comportements s'expriment différemment au sein d'une population [32,33]. Le fait que nous ne détectons aucun gradient de sélection chez les femelles peut expliquer pourquoi nous ne détectons pas de sélection au niveau populationnel, car la sélection au niveau populationnel est la somme de la sélection des mâles et des femelles. Pour simplifier, les gradients de sélection au niveau populationnel sont atténués par leur absence chez les femelles. Ces différences de gradients entre les sexes entraînent plusieurs conséquences. Premièrement, elles témoignent qu'un conflit sexuel est présent dans cette population [47,72]. Ainsi, chaque sexe possède ses propres stratégies pour optimiser sa valeur adaptative induisant des patrons de sélection différents entre les sexes, produisant le conflit entre les sexes. Si les différences de sélection persistent entre les sexes, il est possible qu'un dimorphisme sexuel apparaisse dans la population sur ces caractères comportementale [47,73]. Deuxièmement, les mâles sont sélectionnés pour être plus téméraires et plus variables dans leur activité, ce qui pourrait conduire soit à une augmentation des contacts des mâles dans les zones traitées avec un pesticide, soit à un évitement accru des zones traitées. Cependant, nous n'avons pas réussi à démontrer que les punaises évitaient les d'insecticides dans le dernier test d'évitement.

Nous n'avons pas détecté de différence significative dans les gradients de sélection sur le comportement entre les cages traitées au pesticide et celles traitées à l'eau. Cette absence de différence peut être due à la réduction marginale de la survie entre les deux traitements. Il est possible que la quantité de d'insecticides appliquée ou son application sur les plants de fraise n'ait pas été suffisante pour générer une force de sélection conséquente pour être détectée. Plus d'études en laboratoire sont nécessaires pour confirmer que le pesticide peut agir comme un agent de sélection fort et quantifier leur force de sélection sur les punaises termes.

Étonnement, pour la population survivante aux tests, nous observons un très faible score de répétabilité pour les deux comportements autant au niveau populationnel qu'entre les sexes ou les traitements. Il n'est pas surprenant d'estimer des faibles scores de répétabilité pour le comportement [74] car le comportement est un trait labile avec une grande variabilité [41,74,75]. Cependant la répétabilité de l'activité ou de la témérité est proche de 0, reflétant une très faible variance inter-individuelle (différence individuelle) dans cette population ou alors une fort variance résiduelle ou intra-individuelle (au sein des individus) [76,77]. Il est possible que le test « *openfield* » ne soit pas le plus adapté pour cette espèce, toutefois cela est très peu probable car ce test a été effectué sur plusieurs espèces d'insectes avec succès [78–80]; de plus le test « *openfield* » est un outil très conventionnel et standardisé pour étudier le comportement animal [27,48,49].



Pour conclure, des études complémentaires sont nécessaires pour confirmer l'effet des insecticides sur le comportement des populations de punaises ternes. Toutefois, les différences de sélection entre les sexes ont permis de dévoiler la complexité des forces de sélection au sein de cette espèce et donc la nécessité de mieux comprendre comment l'évolution du comportement peut être dissocié entre les sexes et comment il peut être altéré par l'utilisation de insecticides afin de mieux conseiller les producteurs dans leurs stratégies de lutte contre ce ravageur.

#### Livrables 2022-2023

- collecte d'individus sur le terrain- **réalisé**
- établissement de lignées isofemelles- **réalisé**
- réalisation essais en labo-potentiel évolutif des caractères associés à la sensibilité aux méthodes de lutte- **réalisé**
- élevages en laboratoire- **réalisé**
- cartographie de la variabilité génétique des populations de PT- **réalisé**
- modèle prévisionnel facilitant la prise de décision au champ par les producteurs – **réalisé, à terminer**

#### **Reference:**

1. 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.
2. Strong, F. Physiology of Injury Caused by *Lygus Hesperus*. *Journal of Economic Entomology* **1969**.
3. 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.
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. 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**.
6. 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.
7. Dumont, F.; Provost, C. Using Autumnal Trap Crops to Manage Tarnished Plant Bugs (*Lygus Lineolaris*). *Insects* **2022**, *13*, 441.
8. 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. *Environmental Entomology* **2013**, *42*, 770–778, doi:10.1603/EN12353.
9. Smith, J.H.; Crow, W.D. Evaluating Selected Insecticides for Tarnished Plant Bug Control in Cotton, 2020. *Arthropod Management Tests* **2021**, *46*, tsab046, doi:10.1093/amt/tsab046.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.





14. 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.
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. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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*, 2067–2072.
20. 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). *Journal of medical entomology* **2009**, *46*, 292–306.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Romero, A.; Potter, M.F.; Haynes, K.F. Behavioral Responses of the Bed Bug to Insecticide Residues. *Journal of medical entomology* **2009**, *46*, 51–57.
25. Fray, L.M.; Leather, S.R.; Powell, G.; Slater, R.; McIndoe, E.; Lind, R.J. Behavioural Avoidance and Enhanced Dispersal in Neonicotinoid-Resistant *Myzus Persicae* (Sulzer). *Pest management science* **2014**, *70*, 88–96.
26. Barnett, S.A. Exploratory Behaviour. *British Journal of Psychology* **1958**, *49*, 289–310.
27. Carter, A.J.; Feeney, W.E.; Marshall, H.H.; Cowlshaw, G.; Heinsohn, R. Animal Personality: What Are Behavioural Ecologists Measuring?: What Are Animal Personality Researchers Measuring. *Biol Rev* **2013**, *88*, 465–475, doi:10.1111/brv.12007.
28. 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.
29. 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.
30. Falconer, D.S.; Mackay, T.F.C. *Introduction to Quantitative Genetics*; Longman; 4th edition, 1983;
31. Lynch, M.; Walsh, B. *Genetics and Analysis of Quantitative Traits*.; Sinauer Sunderland, 1998;
32. Lande, R.; Arnold, S.J. The Measurement of Selection on Correlated Characters. *Evolution* **1983**, *37*, 1210–1226.
33. 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.
34. Chown, S.L.; Gaston, K.J. Body Size Variation in Insects: A Macroecological Perspective. *Biological Reviews* **2010**, *85*, 139–169.
35. Clapham, M.E.; Karr, J.A. Environmental and Biotic Controls on the Evolutionary History of Insect Body Size. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2012**, *109*, 10927–10930.



36. Schramm, B.W.; Labecka, A.M.; Gudowska, A.; Anto\l, A.; Sikorska, A.; Szabla, N.; Bauchinger, U.; Kozłowski, J.; Czarnoleski, M. Concerted Evolution of Body Mass, Cell Size and Metabolic Rate among Carabid Beetles. *Journal of Insect Physiology* **2021**, *132*, 104272.
37. Boggs, C.L. Understanding Insect Life Histories and Senescence through a Resource Allocation Lens. *Functional Ecology* **2009**, *23*, 27–37.
38. Eck, D.J.; Shaw, R.G.; Geyer, C.J.; Kingsolver, J.G. An Integrated Analysis of Phenotypic Selection on Insect Body Size and Development Time. *Evolution* **2015**, *69*, 2525–2532.
39. Me\djedović, J.; Bulut, T. A Life-History Perspective on Body Mass: Exploring the Interplay between Harsh Environment, Body Mass, and Mating Success. *Evolutionary Behavioral Sciences* **2019**, *13*, 84.
40. Nylin, S.; Gotthard, K. Plasticity in Life-History Traits. *Annual review of entomology* **1998**, *43*, 63–83.
41. White, C.R. Allometric Estimation of Metabolic Rates in Animals. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology* **2011**, *158*, 346–357.
42. Careau, V.; Thomas, D.; Humphries, M.M.; Réale, D. Energy Metabolism and Animal Personality. *Oikos* **2008**, *117*, 641–653.
43. Teder, T.; Kaasik, A.; Taits, K.; Tammaru, T. Why Do Males Emerge before Females? Sexual Size Dimorphism Drives Sexual Bimaturism in Insects. *Biological Reviews* **2021**, *96*, 2461–2475.
44. Teder, T.; Tammaru, T. Sexual Size Dimorphism within Species Increases with Body Size in Insects. *Oikos* **2005**, *108*, 321–334.
45. Stillwell, R.C.; Blanckenhorn, W.U.; Teder, T.; Davidowitz, G.; Fox, C.W. Sex Differences in Phenotypic Plasticity Affect Variation in Sexual Size Dimorphism in Insects: From Physiology to Evolution. *Annual review of entomology* **2010**, *55*, 227–245.
46. Lande, R. SEXUAL DIMORPHISM, SEXUAL SELECTION, AND ADAPTATION IN POLYGENIC CHARACTERS. *Evolution* **1980**, *34*, 292–305, doi:10.1111/j.1558-5646.1980.tb04817.x.
47. Bonduriansky, R.; Chenoweth, S.F. Intralocus Sexual Conflict. *Trends in Ecology & Evolution* **2009**, *24*, 280–288, doi:10.1016/j.tree.2008.12.005.
48. 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.
49. 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.
50. R Core Team *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing; 2022; ISBN3-900051-07-0 <https://www.R-project.org>, 2022;
51. Bürkner, P. Brms: An R Package for Bayesian Multilevel Models Using Stan. *Journal of Statistical Software* **2017**, *80*, 1–28.
52. 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.
53. de Villemereuil, P. On the Relevance of Bayesian Statistics and MCMC for Animal Models. *Journal of Animal Breeding and Genetics* **2019**, *136*, 339–340, doi:10.1111/jbg.12426.
54. Kingsolver, J.G.; Hoekstra, H.E.; Hoekstra, J.M.; Berrigan, D.; Vignieri, S.N.; Hill, C.E.; Hoang, A.; Gibert, P.; Beerli, P. The Strength of Phenotypic Selection in Natural Populations. *The American Naturalist* **2001**.
55. 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.
56. 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.
57. Downes, S.J. Insect Pest Management and Ecological Research: BOOK REVIEW. *Austral Ecology* **2005**, *30*, 126–127, doi:10.1111/j.1442-9993.2005.01401.x.
58. Stenberg, J.A. A Conceptual Framework for Integrated Pest Management. *Trends in Plant Science* **2017**, *22*, 759–769, doi:10.1016/j.tplants.2017.06.010.
59. 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.



60. French-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.
61. Gould, F.; Brown, Z.S.; Kuzma, J. Wicked Evolution: Can We Address the Sociobiological Dilemma of Pesticide Resistance? *Science* **2018**, *360*, 728–732, doi:10.1126/science.aar3780.
62. 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.
63. Peterson, R.K.D.; Higley, L.G.; Pedigo, L.P. Whatever Happened to IPM? *American Entomologist* **2018**, *64*, 146–150, doi:10.1093/ae/tmy049.
64. Bras, A.; Roy, A.; Heckel, D.G.; Anderson, P.; Karlsson Green, K. Pesticide Resistance in Arthropods: Ecology Matters Too. *Ecology Letters* **2022**, *25*, 1746–1759, doi:10.1111/ele.14030.
65. Groeters, F.R.; Tabashnik, B.E. Roles of Selection Intensity, Major Genes, and Minor Genes in Evolution of Insecticide Resistance. *ec* **2000**, *93*, 1580–1587, doi:10.1603/0022-0493-93.6.1580.
66. 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.
67. Stinchcombe, J.R.; Agrawal, A.F.; Hohenlohe, P.A.; Arnold, S.J.; Blows, M.W. ESTIMATING NONLINEAR SELECTION GRADIENTS USING QUADRATIC REGRESSION COEFFICIENTS: DOUBLE OR NOTHING? *Evolution* **2008**, *62*, 2435–2440, doi:10.1111/j.1558-5646.2008.00449.x.
68. 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.
69. Sih, A.; Bell, A.M. Chapter 5 Insights for Behavioral Ecology from Behavioral Syndromes. In *Advances in the Study of Behavior*; Elsevier, 2008; Vol. 38, pp. 227–281 ISBN 978-0-12-004538-9.
70. 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, doi:10.1086/422893.
71. Sih, A.; Cote, J.; Evans, M.; Fogarty, S.; Pruitt, J. Ecological Implications of Behavioural Syndromes: Ecological Implications of Behavioural Syndromes. *Ecology Letters* **2012**, *15*, 278–289, doi:10.1111/j.1461-0248.2011.01731.x.
72. Cox, R.M.; Calsbeek, R. Sexually Antagonistic Selection, Sexual Dimorphism, and the Resolution of Intra-locus Sexual Conflict. *The American Naturalist* **2009**, *173*, 176–187, doi:10.1086/595841.
73. Van Doorn, G.S. Intra-locus Sexual Conflict. *Annals of the New York Academy of Sciences* **2009**, *1168*, 52–71, doi:10.1111/j.1749-6632.2009.04573.x.
74. Bell, A.M.; Hankison, S.J.; Laskowski, K.L. The Repeatability of Behaviour: A Meta-Analysis. *Animal Behaviour* **2009**, *77*, 771–783, doi:10.1016/j.anbehav.2008.12.022.
75. Mitchell, D.J.; Fanson, B.G.; Beckmann, C.; Biro, P.A. Towards Powerful Experimental and Statistical Approaches to Study Intra-individual Variability in Labile Traits. *Royal Society open science* **2016**, *3*, 160352.
76. Dingemanse, N.J.; Dochtermann, N.A. Quantifying Individual Variation in Behaviour: Mixed-Effect Modelling Approaches. *J Anim Ecol* **2013**, *82*, 39–54, doi:10.1111/1365-2656.12013.
77. Nakagawa, S.; Schielzeth, H. Biological Reviews - 2010 - Nakagawa - Repeatability for Gaussian and Non-Gaussian Data a Practical Guide for Biologists.Pdf. *Biological Reviews* **2010**, *85*, 935–956.
78. Han, C.S.; Dingemanse, 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.
79. Royauté, R.; Hedrick, A.; Dochtermann, N. Sex-Specific Behavioral Syndromes Allow the Independent Evolution of Behavioral Dimorphism. *EcoEvoRxiv* **2021**, doi:10.32942/OSF.IO/4ABP6.
80. Santostefano, F.; Wilson, A.J.; Araya-Ajoy, Y.G.; Dingemanse, N.J. Interacting with the Enemy: Indirect Effects of Personality on Conspecific Aggression in Crickets. *BEHECO* **2016**, *27*, 1235–1246, doi:10.1093/beheco/arw037.
81. Garnier, S. TrackR - Multi-Object Tracking with R 2022.



### 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 :

- 25) Le produit à un certain potentiel commercial (tous les essais sont terminés).
- 26) Le produit a été commercialisé.
- 27) 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.

Les populations de punaises ternes ont le potentiel d'évoluer en réponses aux pratiques cultures en milieu agricole. Nos tests ont démontré que les mâles et les femelles n'ont pas la même susceptibilité aux insecticides. Ainsi, en choisissant certaines pratiques culturelles, il serait possible de mettre une pression particulière sur les mâles ou sur les femelles selon les objectifs visés. Cette stratégie pourrait faire évoluer le comportement d'évitement des insecticides (i.e., résistance comportementale). Toutefois, dans l'état actuel des connaissances, il est difficile de prédire la direction de ces changements. Cette réponse dépend de la contribution des mâles et des femelles aux génotypes et phénotypes de la génération subséquente et de la structure génétique déterminant les comportements des punaises ternes.

Les résultats font avancer les connaissances sur le potentiel évolutif des punaises ternes et les conséquences des pratiques cultures sur la composition des populations de punaises ternes. Toutefois, nos résultats ne peuvent être appliqués de façon pratique pour les producteurs à ce stade-ci de développement.