

# La quantité de poison dépend-elle de la dose? Les insecticides neurotoxiques altèrent l'orientation et la reproduction des prédateurs, même à de faibles concentrations

Luis C. Passos<sup>a,b</sup>, Michele Ricupero<sup>b</sup>, Antonio Gugliuzzo<sup>b</sup>, Marianne A. Soares<sup>a</sup>, Nicolas Desneux<sup>c</sup>, Geraldo A. Carvalho<sup>a</sup>, Lucia Zappalà<sup>b</sup> and Antonio Biondi<sup>b</sup>

Correspondence to: Antonio Biondi, Department of Agriculture, Food and Environment, University of Catania, Via Santa Sofia 100, 95123 Catania, Italy. E-mail: antonio.biondi@unict.it

a Laboratório de Ecotoxicologia e MIP, Departamento de Entomologia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brazil

b Department of Agriculture, Food and Environment, University of Catania, Catania, Italy

c Université Côte d'Azur, INRAE, CNRS, UMR ISA, Nice, 06000, France

This document is a translated French version of the article ([wileyonlinelibrary.com DOI 10.1002/ps.6789](https://www.wileyonlinelibrary.com/doi/10.1002/ps.6789)). The authors decline all responsibility for any translation errors with respect to the original version.

Ce document est une version traduite de l'article en français ([wileyonlinelibrary.com DOI 10.1002/ps.6789](https://www.wileyonlinelibrary.com/doi/10.1002/ps.6789)). Les auteurs déclinent toute responsabilité pour toute erreur de traduction par rapport à la version originale.

## Résumé

**BACKGROUND:** Les pesticides peuvent être nocifs pour les arthropodes bénéficiaires non ciblés et leurs effets négatifs ont été récemment réévalués même à de faibles doses. Le prédateur *Nesidiocoris tenuis* (Reuter) (Hemiptera: Miridae) joue un rôle important dans la lutte contre les insectes nuisibles dans les cultures solanacées, mais son herbivorie simultanée pose souvent des problèmes pertinents pour la production de tomates. Bien que les effets secondaires des insecticides sur *N. tenuis* aient été étudiés précédemment, on sait peu de choses sur les implications potentielles des produits chimiques neurotoxiques à faibles concentrations. Nous avons évalué la toxicité de base de trois insecticides neurotoxiques (lambda-cyhalothrine, spinosad et chlorpyrifos) sur *N. tenuis* par exposition topique de contact. La capacité comportementale et de reproduction du prédateur a ensuite été étudiée après exposition à trois concentrations estimées faiblement létales (LC1, LC10 et LC30).

**RÉSULTATS:** La survie du prédateur a varié selon les insecticides et les concentrations, avec des rapports LC30/taux d'étiquetage allant de 8,45% à 65,40% pour le spinosad et la lambda-cyhalothrine, respectivement. Tous les insecticides ont réduit la fertilité des femelles de *N. tenuis* à toutes les concentrations estimées faiblement létales. Le chlorpyrifos a sérieusement compromis l'orientation des prédateurs vers une plante hôte même à la LC1, alors que le même effet a été observé pour la lambda-cyhalothrine et le spinosad uniquement à la LC30. La lambda-cyhalothrine (à toutes les concentrations) et le chlorpyrifos (à LC10 et LC30) ont également affecté le temps pris par les femelles de *N. tenuis* pour faire un choix.

**CONCLUSION:** Les résultats indiquent que les trois insecticides peuvent être préjudiciables à *N. tenuis* et devraient être évités lorsque la présence du prédateur est souhaitée.

2022 Les auteurs. Pest Management Science publié par John Wiley & Sons Ltd au nom de la Society of Chemical Industry.

Keywords: ecotoxicology; sublethal effects; predatory mirid; pesticides; integrated pest management.

## 1. Introduction

Les pesticides ont été accusés de leurs conséquences négatives sur la biodiversité et son fonctionnement, bien que leur utilité dans la gestion efficace des ravageurs des plantes reste indéniable [1,2]. Les pesticides sont susceptibles de modifier les organismes non ciblés présents dans l'agroécosystème, entraînant la perturbation des services écologiques qu'ils fournissent, tels que la pollinisation, le cycle des nutriments et le contrôle biologique [3,4]. Pour cette raison, les études sur les effets secondaires des pesticides sont encouragées afin de fournir de nouvelles informations pour atténuer leurs impacts négatifs sur les arthropodes non ciblés. C'est la raison pour laquelle les études sur les effets secondaires des pesticides sont encouragées afin de fournir de nouvelles idées pour atténuer leurs impacts négatifs sur les arthropodes bénéficiaux non ciblés [5-9]. Ceci est particulièrement pertinent dans les programmes de lutte intégrée contre les ravageurs (IPM) dans lesquels les ennemis naturels sont souvent délibérément libérés et/ou conservés afin de réduire le nombre de ravageurs. délibérément relâchés et/ou conservés pour réduire les populations de ravageurs [10-14].

Les dépistages écotoxicologiques sont généralement basés sur des lignes directrices élaborées par des institutions non gouvernementales, et dans l'Union européenne (EU), l'évaluation du risque écotoxicologique des pesticides vis-à-vis des arthropodes non ciblés a été élaborée dans le Guide Document on Terrestrial Ecotoxicology, [15] suivant la recommandation de la norme européenne characteristics of beneficials regulatory testing (ESCORT) de la Society of environmental toxicology and chemistry (SETAC) pour les arthropodes non abeilles [16,17]. La plupart des études écotoxicologiques consistent en des essais en laboratoire visant à tester la plus forte dose de pesticide recommandée par les fabricants. Cependant, les pesticides sont naturellement dégradés par des facteurs biotiques et abiotiques, [18,19] et leur dérive peut également se produire dans le field, ce qui entraîne des doses plus faibles par rapport à leur application initiale [20,21]. Par conséquent, les organismes non ciblés présents dans l'agro-système peuvent être exposés à des résidus chimiques à de faibles concentrations et les individus survivants peuvent subir des effets sublétaux associés [19,22-24].

Ces effets peuvent inclure une baisse de la fertilité et une réduction de la capacité de prédation/parasitisme, ce qui peut affecter négativement l'établissement des ennemis naturels dans le field et biaiser leur efficacité à réduire les populations de ravageurs [3,25,26]. Les prédateurs hémiptères sont d'une importance capitale pour la lutte biologique contre les insectes nuisibles dans les cultures sous serre car ils sont capables de contrôler les populations de plusieurs arthropodes nuisibles [26-31]. Parmi les prédateurs mirides (Hemiptera: Miridae), le zoophytophage *Nesidiocoris tenuis* (Reuter) (Hemiptera: Miridae) est l'une des espèces les plus utilisées pour la lutte biologique dans le Paléarctique. *Nesidiocoris tenuis* a un rôle multiple dans la lutte contre les ravageurs des serres en raison de sa grande efficacité contre un certain nombre de ravageurs, y compris les pucerons, les whiteflies et les lépidoptères, tels que l'oxyure de la tomate d'Amérique du Sud, *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) [32]. En outre, l'utilisation de *N. tenuis* a été encouragée en raison de sa capacité à amorcer les mécanismes de défense induits des plantes [33]. Cependant, en raison de son activité d'alimentation des plantes lorsque les proies sont rares, *N. tenuis* peut devenir un ravageur car ce prédateur peut causer des dommages aux plantes à des niveaux de population élevés [39-41]. Malgré cet inconvénient, les programmes (IPM) de gestion préventive dépendent toujours du contrôle biologique fourni par *N. tenuis*. Par conséquent, le prédateur peut être souvent exposé aux insecticides organiques et/ou synthétiques couramment adoptés dans ces programmes [42-45].

Des études antérieures ont examiné l'impact des insecticides sur *N. tenuis* en termes d'effets létaux et sublétaux. *N. tenuis* en termes d'effets létaux et sublétaux, en exposant les adultes de *N. tenuis* adultes à des composés neurotoxiques synthétiques et organiques par différentes voies d'exposition (c'est-à-dire proies contaminées, pulvérisation directe et contact résiduel) [27,28,46,47]. Néanmoins, la plupart des études n'ont porté que sur le taux d'étiquetage maximal de ces composés. A notre connaissance, il n'existe aucune information concernant les effets de faibles concentrations d'insecticides sur la capacité d'orientation de *N.*

tenuis, ce qui peut finalement affecter le succès de ce prédateur en tant qu'agent de lutte biologique. Dans cette étude, nous avons émis l'hypothèse que de faibles concentrations d'insecticides neurotoxiques pourraient avoir des effets néfastes sur la physiologie et le comportement de *N. tenuis*. Nous avons testé cette hypothèse par des essais en laboratoire visant à évaluer la fertilité et la réponse olfactive d'adultes de *N. tenuis* exposés topiquement à trois concentrations létales faibles (LC30, LC10, LC1) d'insecticides, précédemment estimées pour ce prédateur miride.

Précédemment estimées pour ce prédateur de mirides. Nos findings peuvent aider à comprendre les circonvolutions des effets secondaires des pesticides à faibles concentrations sur les ennemis naturels et fournir de nouveaux aperçus utiles sur l'association entre le prédateur *N. tenuis* et les insecticides chimiques dans la lutte contre les ravageurs.

## 2 Matériel et méthodes

### 2.1 Matériaux biologiques

Les *Nesidiocoris tenuis* destinés à l'élevage en laboratoire ont été obtenus à partir de collections périodiques dans des serres de tomates biologiques ouvertes situées à Fiumefreddo (Catania, Italie). Les spécimens collectés ont été morphologiquement identifiés et élevés en laboratoire comme suit. Briefly, les adultes de *N. tenuis* (~150 individus) ont été maintenus dans des cages entomologiques (32 × 40 × 70 cm) couvertes par des mailles de filet fine et contenant des semis en pot de sésame (*Sesamum indicum* L., variété T-85 Humera) sans pesticides (~30 cm de hauteur), comme sources d'eau et d'oviposition, selon la méthodologie décrite par Biondi et al [48]. Le mélange commercial d'œufs de la proie alternative *Ephestia kuehniella* Zeller (Lepidoptera: Pyralidae) et de kystes d'*Artemia* spp. (c'est-à-dire Entofood® Koppert) a été offert ad libitum aux prédateurs comme source de nourriture supplémentaire. Les adultes de *Nesidiocoris tenuis* ont été maintenus sur les plantes de sésame pendant 3 jours pour permettre l'accouplement et la ponte; ensuite, les adultes de *N. tenuis* ont été collectés avec un aspirateur mécanique et transférés dans de nouvelles cages comme décrit ci-dessus. Les plantes de sésame portant des œufs de *N. tenuis* ont été isolées à l'intérieur des cages pour l'éclosion des œufs et le développement des nymphes nouvellement écloses jusqu'à l'âge adulte. La moitié des adultes de *N. tenuis* ayant récemment mué ont été collectés à l'aide d'un aspirateur mécanique et utilisés pour les tests biologiques, tandis que le reste a été ajouté à l'élevage. De nouvelles plantes de sésame et Entofood® ont été ajoutés à chaque cage deux fois par semaine. L'élevage a été maintenu dans des conditions de laboratoire ( $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ,  $55\% \pm 5\%$  d'humidité relative, et une photopériode lumière/obscurité de 14:10 h) au Département de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement de l'Université de Catania (Italie).

TABLE 1. Baseline toxicity of three insecticides toward *Nesidiocoris tenuis* females 48 h after topical contact exposure by spraying

Insecticide	Tradename	% a.i.	Label rate (ppm)	Slope ± SE	$\chi^2$ (df)	p-value	Lethal concentration (ppm)	95% Confidence limits (ppm)	% LC/LR <sup>a</sup>
Spinosad	Laser®	44.20	0.3315	1.974 ± 0.260	33.355 (31)	0.353	LC <sub>1</sub> = 3.37 × 10 <sup>-3</sup>	1.35 × 10 <sup>-3</sup> to 5.88 × 10 <sup>-3</sup>	1.08
							LC <sub>10</sub> = 1.14 × 10 <sup>-2</sup>	6.71 × 10 <sup>-3</sup> to 1.62 × 10 <sup>-2</sup>	3.32
							LC <sub>30</sub> = 2.75 × 10 <sup>-2</sup>	2.00 × 10 <sup>-2</sup> to 3.60 × 10 <sup>-2</sup>	8.44
Lambda-cyhalothrin	Karate Zeon®	9.48	0.0236	1.301 ± 0.201	42.901 (36)	0.201	LC <sub>1</sub> = 6.39 × 10 <sup>-4</sup>	1.10 × 10 <sup>-4</sup> to 1.68 × 10 <sup>-3</sup>	2.70
							LC <sub>10</sub> = 4.06 × 10 <sup>-3</sup>	1.49 × 10 <sup>-3</sup> to 7.33 × 10 <sup>-3</sup>	17.13
							LC <sub>30</sub> = 1.55 × 10 <sup>-2</sup>	9.24 × 10 <sup>-3</sup> to 2.22 × 10 <sup>-2</sup>	65.40
Chlorpyrifos	Dursban®	44.53	0.3340	0.948 ± 0.202	35.563 (33)	0.349	LC <sub>1</sub> = 8.87 × 10 <sup>-4</sup>	2.30 × 10 <sup>-4</sup> to 4.09 × 10 <sup>-4</sup>	0.27
							LC <sub>10</sub> = 1.12 × 10 <sup>-2</sup>	1.72 × 10 <sup>-3</sup> to 2.58 × 10 <sup>-2</sup>	3.35
							LC <sub>30</sub> = 7.05 × 10 <sup>-2</sup>	3.34 × 10 <sup>-2</sup> to 1.14 × 10 <sup>-1</sup>	21.11

<sup>a</sup> % LC/LR is percentage of the estimated low-lethal concentration in comparison with the highest label rate recommended in tomato crop.

## 2.2 Insecticides

Afin d'évaluer les effets physiologiques et comportementaux potentiels sur *N. tenuis*, trois insecticides neurotoxiques ont été évalués dans cette étude. Les insecticides, suivis de leur nom commercial, de leur fabricant, de leur groupe chimique et de leur mode d'action, étaient les suivants: lambda-cyhalothrine (Karate Zeon®, Syngenta Italia S.p.a.), un pyréthroïde, modulateur des canaux Na<sup>+</sup>; spinosad (Laser®, Dow AgroSciences S. r. l.), un spinosyn, modulateur des canaux nicotiques acétylchiques. r. l.), un modulateur allostérique du récepteur nicotinique de l'acétylcholine; et le chlorpyrifos (Dursban®, Dow AgroSciences S.r.l.), un organophosphate, inhibiteur de l'acétylcholinestérase (AChE). La lambda-cyhalothrine et le chlorpyrifos sont tous deux des insecticides de synthèse utilisés dans les cultures conventionnelles de tomates dans de nombreux pays, tandis que le spinosad est un insecticide d'origine naturelle, son utilisation est donc autorisée dans les cultures conventionnelles et biologiques. Ces insecticides ont été sélectionnés en raison de leur utilisation potentielle dans les cultures de tomates pour contrôler les ravageurs hémiptères et lépidoptères (tels que les pucerons, les whiteflies et *T. absoluta*), qui sont également des proies de *N. tenuis*.

## 2.3 Toxicité de base des insecticides envers *Nesidiocoris tenuis*

Dans ce bio-essai, nous avons évalué la relation concentration-mortalité-réponse de *N. tenuis* au stade adulte à la lambda-cyhalothrine, au spinosad et au chlorpyrifos par exposition topique de contact. Des femelles nouvellement émergées (~2 jours) ont été exposées par pulvérisation topique à différentes concentrations des insecticides. Pour chaque insecticide, six ou sept concentrations, y compris celle de la plus forte dose indiquée sur l'étiquette, ont été testées (voir tableau 1). Les solutions mères ont été préparées en diluant les formulations insecticides dans de l'eau distillée, conformément aux recommandations du fabricant. En outre, un témoin non traité avec de l'eau distillée a été inclus pour tous les insecticides (appelé "concentration zéro"). Les dilutions d'insecticides étaient basées sur des observations préliminaires visant à identifier la dose minimale nécessaire pour provoquer une mortalité de 100 % des femelles de *N. tenuis* et la dose maximale qui n'affecte pas significativement la mortalité des insectes traités par rapport au témoin non traité. Une méthodologie adaptée pour l'application topique d'insecticides par contact sur le stade adulte de *N. tenuis* a été développée. Briefly, five femelles *N. tenuis* ont été isolées ensemble dans des tubes coniques ventilés en plastique (Falcon®, 50 ml) et maintenues à basse température à l'intérieur d'une boîte thermique isolée avec des packs de glace pendant 3h pour réduire la mobilité des insectes. Ensuite, chaque groupe de femelles *N. tenuis* a été placé dans un gobelet en plastique (100 ml) et pulvérisé topiquement avec des solutions insecticides à l'aide

d'un pulvérisateur manuel (50 ml). L'intérieur des gobelets en plastique était recouvert de papier absorbant afin d'éviter la formation de gouttelettes d'insecticide dans l'arène, prévenant ainsi la mortalité des insectes par noyade. Du papier absorbant propre et neuf était changé dans chaque réplique pour chaque combinaison insecticide-concentration. Après la pulvérisation, chaque groupe de five femelles *N. tenuis* a été transféré dans un pot acrylique ventilé (5,5 cm de diamètre × 3 cm de hauteur), avec un disque de feuille de courgette (*Cucurbita pepo* L.) et Entofood®. Chaque pot contenant five femelles a été considéré comme une réplique. La mortalité causée par les insecticides sur les femelles de *N. tenuis* a été évaluée après 48 h. Huit répétitions ont été effectuées pour chaque combinaison insecticide-concentration.

#### 2.4 Effets sublétaux des insecticides sur la fertilité de *Nesidiocoris tenuis*

L'objectif de ce test biologique était d'évaluer si de faibles concentrations de lambda-cyhalothrine, de spinosad et de chlorpyrifos pouvaient affecter la fertilité du prédateur *N. tenuis*. Sur la base des résultats de l'essai biologique précédent, des mâles et des femelles *N. tenuis* (âgés de 2 jours) nouvellement mués et issus de l'élevage ont été exposés à trois concentrations faiblement létales (LC1, LC10 et LC30) des insecticides susmentionnés. Ces concentrations ont été choisies pour exposer les prédateurs à de faibles concentrations qui peuvent se produire dans des conditions de field après dégradation environnementale d'une pulvérisation complète de l'étiquette, y compris une gamme létale allant de très faible mortalité (CL1) à une mortalité modérée (CL30). Des femelles adultes (âgées de 2 jours) ont été pulvérisées avec les faibles concentrations létales mentionnées ci-dessus et de l'eau distillée, comme décrit dans la section 2.3. Les couples pulvérisés ont été maintenus dans un gobelet en plastique ventilé (400 ml) contenant une cosse de haricot vert (*Phaseolus vulgaris* L., cv. 'Garrafal enana') comme source d'eau et substrat de ponte, 28,49 et des œufs d'*E. kuehniella* (1 g) comme source de nourriture dans l'arène. Chaque couple de *N. tenuis* a été maintenu dans l'arène susmentionnée pendant 3 jours pour augmenter le succès de l'accouplement et laisser les femelles pondre dans le haricot. Les arènes expérimentales contenant des cosses de haricots verts avec des œufs de *N. tenuis* ont été maintenues dans des conditions de laboratoire comme décrit ci-dessus, et le nombre de nymphes nouvellement émergées a été enregistré quotidiennement sous un stéréomicroscope et enlevé avec un pinceau doux. L'évaluation a été poursuivie pendant 20 jours jusqu'à ce qu'aucune nouvelle nymphe n'émerge. Pour chaque combinaison pesticide-concentration et pour le témoin, la fertilité de 25 couples de *N. tenuis* (c'est-à-dire 25 répétitions) a été évaluée.

#### 2.5 Effets sublétaux des insecticides sur l'orientation de *Nesidiocoris tenuis*

Le but de ce bio-essai était d'évaluer si l'orientation du prédateur *N. tenuis* pouvait être affectée par les trois concentrations faiblement létales (LC1, LC10 et LC30) de lambda-cyhalothrine, spinosad et chlorpyrifos. Des femelles adultes (âgées de 2 jours) ont été pulvérisées avec les faibles concentrations létales mentionnées ci-dessus et de l'eau distillée, comme décrit dans la section 2.3. Après avoir été pulvérisées par voie topique, les femelles *N. tenuis* ont été affamées pendant 24 heures dans des flacons transparents (1,5 cm de diamètre × 6 cm de hauteur) avec un tampon de coton humide comme seule source d'eau. Ensuite, chaque femelle *N. tenuis* a été transférée dans un olfactomètre à deux voies (bras principal et bras latéraux de 15 cm de long et 4 cm de diamètre interne). Les sources d'odeurs utilisées étaient l'air pur et une plante de sésame (~20 cm de hauteur). La plante de sésame a été choisie parce que des études précédentes ont démontré que cette plante est très attractive pour *N. tenuis*. 48,50 Une plante de sésame a été placée à l'intérieur de l'un des bords cylindriques en verre (volume de 5 L) connectés aux bras latéraux de l'olfactomètre. Une pompe à air (Airfizz®, Ferplast) produisait un flow unidirectionnel (150 ml min<sup>-1</sup>).

qui passait par un filtre à eau avant d'entrer dans le système de l'olfactomètre, conduisant l'air à travers les bras latéraux de l'olfactomètre et atteignant ainsi le bras principal. L'olfactomètre était placé verticalement sur la surface du banc et les femelles *N. tenuis* étaient placées individuellement sur le bras central. Les essais biologiques ont été réalisés dans une pièce sombre, avec des conditions environnementales contrôlées (25 ± 1°C, 60 ± 10% d'humidité relative) et ont été menés entre 9h00 et 18h00. L'olfactomètre était éclairé par des lampes fluorescentes blanc froid de 22 W, placées à 80 cm au-dessus des bras de l'olfactomètre, conformément à Naselli et al [50]. Le choix de chaque femelle était considéré lorsqu'elle traversait la moitié du bras latéral. Chaque prédateur a été observé pendant 5 minutes et, si aucun choix n'a été fait après ce temps, les femelles *N. tenuis* non répondeuses ont été écartées de l'ensemble des données. Toutes les deux

femelles testées, l'olfactomètre a été inversé pour réduire l'interférence de l'environnement dans la réponse de l'insecte. Pour chaque combinaison insecticide-concentration, au moins 30 répliques, chacune composée d'un insecte ayant fait un choix, ont été réalisées. Le temps pris par les femelles de *N. tenuis* pour faire un choix (pour les insectes qui ont fait un choix) a également été enregistré.

## 2.6 Analyses statistiques

La toxicité de base de la lambda-cyhalothrine, du spinosad et du chlorpyrifos sur *N. tenuis* par exposition topique de contact a été effectuée par un modèle de régression log-probit [51]. Les données de préférence de *N. tenuis* envers les plantes de sésame ont été analysées en utilisant un chi-squared goodness-of-fit pour déterminer si l'attraction des femelles pour les plantes de sésame était différente d'une distribution 50:50. Les données concernant le temps pris par les femelles de *N. tenuis* pour faire un choix et la fertilité ont été testées pour la normalité et l'homoscédasticité [52,53]; cependant, ces hypothèses n'ont pas été satisfaites. Par conséquent, ces données ont été fittées à des modèles linéaires généralisés (GLMs) [54], et l'interaction potentielle entre les facteurs (quatre traitements × trois concentrations) a été testée. Les modèles ont été fittés en utilisant la famille de Poisson pour la fertilité et la famille binomiale négative pour le temps pris par les femelles de *N. tenuis* pour faire un choix (les familles de Poisson et quasi-Poisson ont été fermement testées, mais le modèle binomial négatif a présenté un meilleur fit). Les moyennes ont été séparées par un test HSD de Tukey post-hoc ( $p < 0,05$ ). Les analyses Probit ont été effectuées dans le programme statistique SPSS v. 21.0 (IBM Corp.), tandis que les analyses pour les essais biologiques de fertilité et de réponse olfactive ont été effectuées dans R v. 3.6.0 (R Foundation for Statistical Computing), en utilisant les paquets car et MASS pour le fitting du modèle et le paquet multcomp pour séparer les moyennes [55-57].

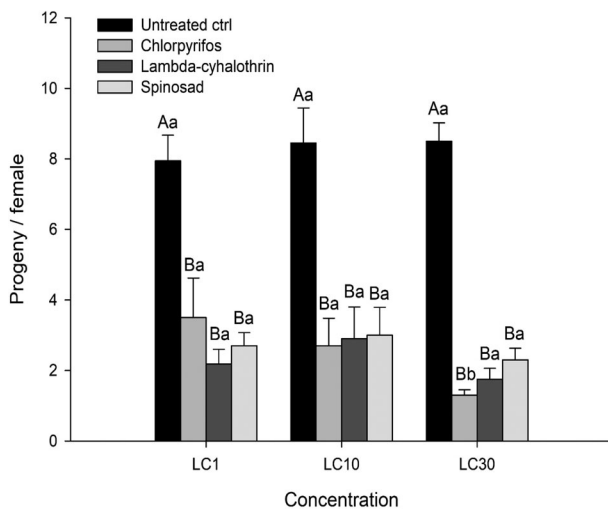


FIGURE 1. Valeurs moyennes ( $\pm$ ) de la fécondité des femelles *Nesidiocoris tenuis* après exposition par contact topique à trois insecticides à trois concentrations faiblement létales et à l'eau distillée (témoin non traité). Les différentes lettres majuscules indiquent des différences significantes entre les traitements d'une concentration, tandis que des lettres minuscules différentes indiquent des différences significantes dans les concentrations d'un traitement (GLM). les concentrations pour un traitement (GLM - distribution de Poisson, test HSD de Tukey,  $p < 0,05$ ). insecticides significantly reduced the fertility of *N. tenuis* females at all the evaluated concentrations (LC<sub>1</sub>:  $\chi^2 = 64.642$ ,  $df = 3$ ,  $p < 0.001$ ; LC<sub>10</sub>:  $\chi^2 = 73.707$ ,  $df = 3$ ,  $p < 0.001$ ; LC<sub>30</sub>:  $\chi^2 = 118.560$ ,  $df = 3$ ,  $p < 0.001$ ). The reduction in fertility was higher for chlorpyrifos at LC<sub>30</sub> ( $\chi^2 = 9.939$ ,  $df = 2$ ,  $p = 0.007$ ), whereas no differences were observed among the concentrations for lambda-cyhalothrin ( $\chi^2 = 2.659$ ,  $df = 2$ ,  $p = 0.265$ ), spinosad ( $\chi^2 = 1.008$ ,  $df = 2$ ,  $p = 0.604$ ) and the control ( $\chi^2 = 0.427$ ,  $df = 2$ ,  $p = 0.808$ ) (Figure 1).

## 3 RÉSULTATS

### 3.1 Toxicité de base des insecticides envers *Nesidiocoris tenuis*

Les modèles probit ont été fittés aux données observées pour tous les traitements (c'est-à-dire qu'il n'y avait pas de différences significantes entre les données observées et les données attendues), validant les concentrations faiblement létales pour tous les insecticides neurotoxiques testés (tableau 1). Tous les insectes traités uniquement avec de l'eau distillée ("concentration zéro") ont survécu pendant toute la période d'évaluation. La lambda-cyhalothrine a été l'insecticide présentant les plus faibles valeurs de CL1, CL10 et CL30, étant la matière active la plus létale pour les femelles de *N. tenuis*. Le spinosad et le chlorpyrifos ont également présenté une toxicité élevée pour le prédateur, comme le soulignent les faibles valeurs de CL30 estimées pour ces composés. Néanmoins, bien que la lambda-cyhalothrine soit la matière active la plus toxique, on a observé que les valeurs de proportion entre les CL10 et CL30 estimées et la dose maximale indiquée sur l'étiquette étaient plus élevées pour cet insecticide (17,13% et 65,40%) par rapport à celles

observées pour le spinosad (3,32% et 8,45%) et le chlorpyrifos (3,35% et 21,11%) (Tableau 1).

### 3.2 Effets sublétaux des insecticides sur la fertilité de *Nesidiocoris tenuis*

Bien que le GLM n'ait révélé aucune interaction significative entre l'insecticide et la concentration ( $\chi^2 = 12,023$ ,  $df = 6$ ,  $p = 0,061$ ), tous les insecticides testés ont réduit de façon significative la fertilité de *N. tenuis* femelles à toutes les concentrations évaluées (LC1:  $\chi^2 = 64,642$ ,  $df = 3$ ,  $p < 0,001$ ; LC10:  $\chi^2 = 73,707$ ,  $df = 3$ ,  $p < 0,001$ ; LC30:  $\chi^2 = 118,560$ ,  $df = 3$ ,  $p < 0,001$ ). La réduction de la fertilité était plus élevée pour le chlorpyrifos à LC30 ( $\chi^2 = 9,939$ ,  $df = 2$ ,  $p = 0,007$ ), alors qu'aucune différence n'a été observée entre les concentrations pour la lambda-cyhalothrine ( $\chi^2 = 2,659$ ,  $df = 2$ ,  $p = 0,265$ ), le spinosad ( $\chi^2 = 1,008$ ,  $df = 2$ ,  $p = 0,604$ ) et le contrôle ( $\chi^2 = 0,427$ ,  $df = 2$ ,  $p = 0,808$ ) (Figure 1).

### 3.3 Effets sublétaux des insecticides sur l'orientation de *Nesidiocoris tenuis*

Une attirance significative vers les plants de sésame était attendue pour les insectes n'ayant subi aucune exposition aux insecticides, et elle a été confirmée pour tous les traitements témoins. Par conséquent, cela a été pris comme référence pour le pourcentage d'insectes s'orientant vers le sésame par rapport à l'air pur pour les traitements avec insecticides. La préférence des femelles de *N. tenuis* pour les plantes de sésame plutôt que pour l'air pur n'a pas été affectée par la lambda-cyhalothrine ou le spinosad à LC1 et LC10. En revanche, les choix des insectes traités au chlorpyrifos ne différaient pas entre le sésame et l'air pour ces deux concentrations faiblement létales. À la LC30, tous les insecticides ont affecté

*N. tenuis* l'orientation, ce qui n'a entraîné aucune différence entre la proportion de choix pour le sésame et l'air pur (Figure 2). Des différences dans le temps pris par les femelles *N. tenuis* pour faire un choix ont été observées à toutes les concentrations faiblement létales (LC1:  $\chi^2 = 9,358$ ,  $df = 3$ ,  $p = 0,024$ ; LC10:  $\chi^2 = 22,566$ ,  $df = 3$ ,  $p < 0,001$ ; LC30:  $\chi^2 = 33,291$ ,  $df = 3$ ,  $p < 0,001$ ) (Figure 3). Les insectes traités avec toutes les concentrations testées de lambda-cyhalothrine ont mis plus de temps à faire un choix par rapport au traitement témoin. La même chose a été observée pour les insectes traités au chlorpyrifos aux concentrations LC10 et LC30. Pour les femelles traitées avec toutes les concentrations de spinosad, le temps nécessaire pour faire un choix n'a pas été affecté par rapport au traitement de contrôle. Aucune différence n'a été observée entre les concentrations pour aucun des traitements (contrôle:  $\chi^2 = 0,508$ ,  $df = 2$ ,  $p = 0,777$ ; lambda-cyhalothrine:  $\chi^2 = 0,634$ ,  $df = 2$ ,  $p = 0,729$ ; chlorpyrifos:  $\chi^2 = 4,981$ ,  $df = 2$ ,  $p = 0,083$ ; spinosad:  $\chi^2 = 3,589$ ,  $p = 0,166$ ) (Figure 3). Il n'y avait pas d'interaction entre les traitements et les concentrations pour le temps pris par les femelles de *N. tenuis* pour faire un choix ( $\chi^2 = 9,066$ ,  $df = 6$ ,  $p = 0,170$ ), les données ont donc été évaluées séparément.

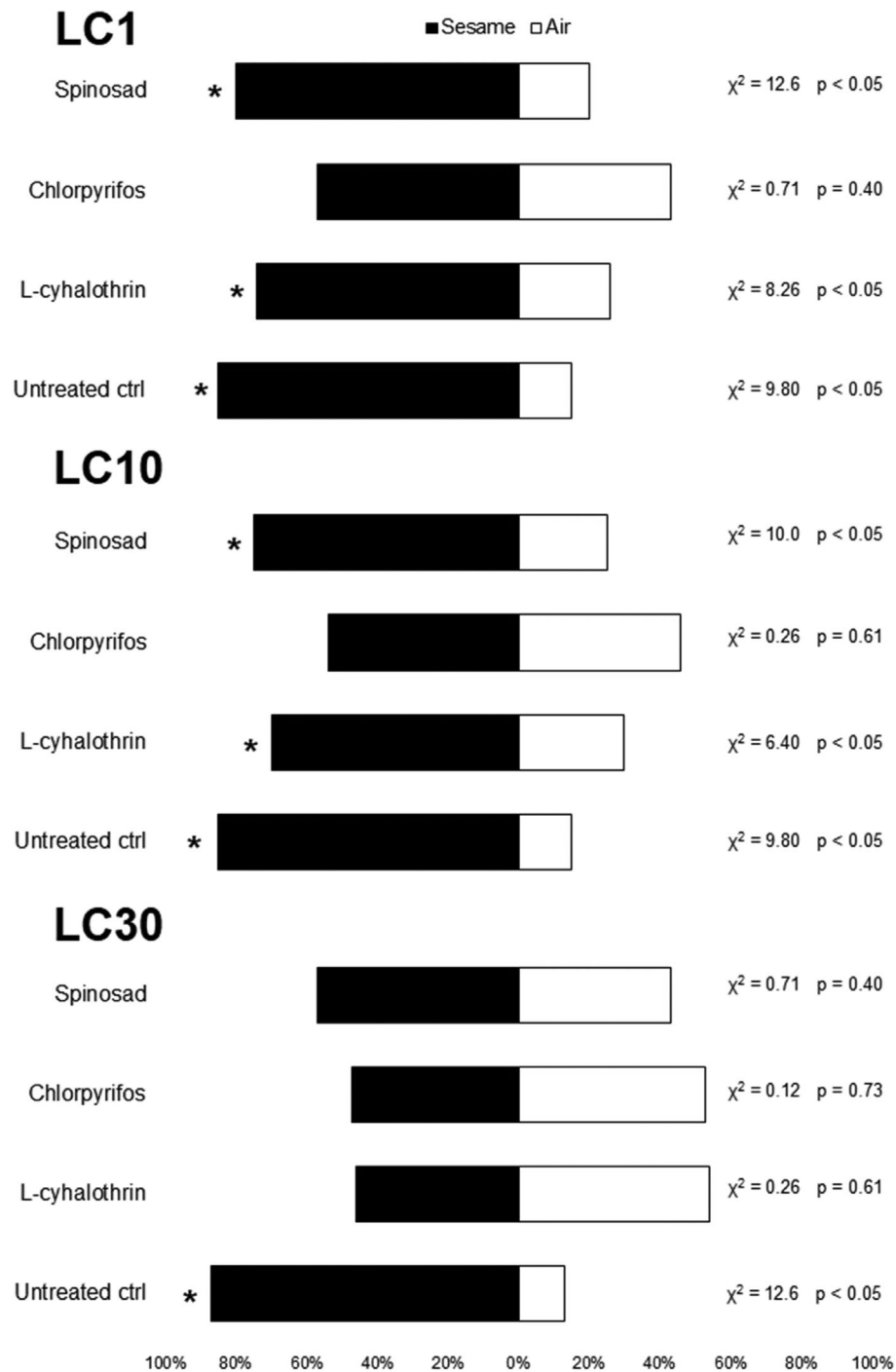


FIGURE 2. Réponse des femelles de *Nesidiocoris tenuis* exposées topiquement à trois insecticides à trois concentrations faiblement létales (LC1, LC10 et LC30) et à de l'eau non traitée (contrôle non traité) aux substances volatiles produites par une plante *Sesamum indicum*. Les pourcentages indiquent la proportion de choix pour le sesame et l'air pur. Les astérisques indiquent les différences dans l'attraction pour *S. indicum* et l'air pur selon le chi carré de vraisemblance ( $p < 0,05$ ).

#### 4 DISCUSSION

Dans de nombreux systèmes, les insecticides à large spectre, tels que les insecticides neurotoxiques, sont les composés les plus utilisés pour la lutte contre les nuisibles en raison de leur efficacité dans la lutte contre les nuisibles. Cependant, une vaste littérature a documenté concernant les effets néfastes sur les organismes



beneficiales causés par ces outils efficaces [3,58,59]. Pour préserver les fonctions écologiques des organismes bénéficiales dans l'agroécosystème (y compris la lutte biologique) les insecticides sélectifs devraient être préférés dans la gestion des ravageurs [5,22,26,60-62]. En outre, les insecticides peuvent causer des effets sublétaux qui peuvent biaiser la lutte biologique fournie par les prédateurs et les parasitoïdes [3,24]. Ces altérations peuvent être observées chez des individus qui ont survécu à la fois à des taux d'étiquetage complets de composés sélectifs et à des concentrations plus faibles d'insecticides à large spectre, ce qui peut se produire après une dégradation naturelle dans des conditions de field [22,63-65]. Les modèles Probit sont souvent utilisés pour estimer la concentration-mortalité des pesticides pour les ravageurs et les ennemis naturels, afin de sélectionner des composés efficaces et sûrs, respectivement. 49,65-68 Dans nos observations, la lambda-cyhalothrine était le composé le plus toxique pour le prédateur, car des valeurs inférieures ont été estimées pour toutes les concentrations létales. Le spinosad était l'insecticide le moins toxique à la CL1 pour *N. tenuis*; cependant, à la CL30, cet insecticide était plus toxique que le chlorpyrifos. La pente la plus élevée estimée pour le traitement au spinosad indique qu'une légère augmentation de la concentration d'insecticide peut entraîner une forte mortalité des prédateurs. 69 De plus, en raison de la concentration plus faible de la matière active dans l'insecticide à base de lambda-cyhalothrine, la différence entre la dose maximale indiquée sur l'étiquette et les CL10 et CL30 estimées est plus faible pour la lambda-cyhalothrine que pour les produits commerciaux spinosad et chlorpyrifos. Par conséquent, malgré les valeurs de CL10 et de CL30 plus élevées observées pour le spinosad et le chlorpyrifos, ces insecticides pourraient être encore plus toxiques que la lambda-cyhalothrine dans des conditions de field. Outre la mortalité, tous les insecticides aux trois concentrations évaluées ont réduit la fertilité du prédateur *N. tenuis*. Les paramètres de reproduction sont parmi les caractéristiques biologiques les plus sensibles aux insecticides et les plus importantes en termes de dynamique des populations [70] Comme nos résultats, une réduction de la progéniture de *N. tenuis* a également été observée pour les pyréthroïdes cyperméthrine et deltaméthrine [28,46]. En outre, les pyréthroïdes peuvent être utilisés à des concentrations sublétales pour contaminer les filets anti-insectes, et Biondi et al. ont constaté que l'exposition continue des adultes de *T. absoluta* à ces filets peut provoquer une variété d'effets sublétaux chroniques plutôt qu'une toxicité aiguë [71]. Des concentrations plus faibles de l'organophosphate chlorpyrifos ont également été fréquemment rapportées comme ayant des effets négatifs sur la reproduction des ennemis naturels. A LC30, plusieurs effets sublétaux ont été observés sur l'hémiptère *Andrallus spinidens* Fabricius (Hemiptera: Pentatomidae), tels que la réduction de la fertilité et de l'activité enzymatique, et des altérations des paramètres de la table de vie [72]. Fernandes et al. ont observé des effets négatifs sur la reproduction après une exposition au chlorpyrifos à LC20 pour le prédateur *Orius insidiosus* (Say) (Hemiptera: Anthocoridae) [67]. De plus, le spinosad a réduit la descendance des punaises prédatrices, telles que *Orius laevigatus* (Fieber) (Hemiptera : Anthocoridae) [22], *Macrolophus pygmaeus* (Rambur) (Hemiptera : Miridae) [27,73] et *Deraeocoris brevis* (Uhler) (Hemiptera : Miridae) [74].

Des effets négatifs ont également été observés dans les traits comportementaux de *N. tenuis*. Dans les traitements insecticides, le spinosad et la lambda-cyhalothrine à LC30 et le chlorpyrifos à toutes les concentrations ont affecté la capacité d'orientation du prédateur. De plus, les deux insecticides de synthèse ont également augmenté le temps mis par les femelles de *N. tenuis* pour faire un choix. En raison de leur action neurotoxique, ces trois insecticides peuvent affecter la capacité du système nerveux à réagir aux stimuli externes [59,63,72,75]. Les résultats comportementaux de cette étude sont cohérents avec la neurotoxicité associée à la lambda-cyhalothrine. Les effets délétères causés par les pyréthroïdes résultent d'un blocage de la conduction des stimuli électriques en raison de l'ouverture permanente des canaux sodiques pendant que l'insecticide agit, ce qui entraîne des répercussions comportementales et physiologiques [59,76]. Desneux et al. ont également observé que des doses sublétales de lambda-cyhalothrine (LDO,1) affectaient le comportement d'orientation du parasitoïde *Aphidius ervi* Haliday (Hymenoptera : Braconidae). 63 Le parasitoïde *Aphidius colemani* Viereck (Hymenoptera : Braconidae) a présenté une réduction du parasitisme et de la longévité après un traitement avec des concentrations sublétales de lambda-cyhalothrine. 77 Soares et al. ont également observé des altérations du comportement de *N. tenuis* causées par la lambda-cyhalothrine [26].

De même, un manque de coordination est associé à l'intoxication au chlorpyrifos [72]. L'orientation biaisée des femelles de *N. tenuis* traitées au chlorpyrifos à LC1, LC10 et LC30 indique que cet insecticide peut affecter le comportement du prédateur même à de très faibles concentrations. Le temps pris par les femelles *N.*

tenuis pour faire un choix a également augmenté après le traitement avec LC10 et LC30. Fernandes et al. ont observé des effets négatifs sur le taux de prédation après une exposition au chlorpyrifos à LC20 pour le prédateur *O. insidiosus* [67]. Le prédateur *M. pygmaeus* a également montré des altérations comportementales (réduction du taux d'attaque et augmentation du temps de manipulation) après un traitement au chlorpyrifos à LC30 [78]. En revanche, les études concernant les effets secondaires du spinosad sur le comportement des insectes bénéficiaux sont rares. Par exemple, Barbosa et al. ont observé des altérations de l'activité de marche chez l'abeille sans dard *Melpona quadrifasciata* Depeleiter (Hymenoptera: Apidae) après une exposition au Spinosad [79]. Néanmoins, en raison de l'effet toxique sur le système nerveux, les insectes intoxiqués par le spinosad peuvent présenter des symptômes tels qu'un manque de coordination, un tremblement des appendices et une perception compromise des stimuli externes, ce qui peut finalement entraîner une réduction de la capacité de prédation d'un ennemi naturel [75,80-82].

Les plantes de différentes familles botaniques, telles que les Asteraceae, Solanaceae et Pedaliaceae, sont adaptées au développement biologique de *N. tenuis*. Ces plantes pourraient servir de sources d'eau et de ponte, et sont également des plantes où l'on peut trouver les proies de *N. tenuis* dans le field [39,48]. Pour cette raison, la perturbation de la capacité des prédateurs à localiser directement les plantes hôtes influence leur survie et leur succès en tant qu'agents de lutte biologique. La désorientation causée par de plus faibles concentrations d'insecticides pourrait également compromettre la capacité de *N. tenuis* à localiser les plantes infestées de proies herbivores, comme cela a été observé pour le prédateur *Cyrtorhinus lividipennis* Reuter (Hemiptera: Miridae) après exposition au pyréthroïde deltaméthrine [83]. Des études supplémentaires sont nécessaires sur ce point du système. En résumé, nous avons observé que le spinosad, le chlorpyrifos et la lambda-cyhalothrine peuvent être toxiques pour le prédateur *N. tenuis*, même à de faibles concentrations, avec des effets sur la fertilité et l'orientation. En plus des résultats de laboratoire, des essais field doivent être réalisés pour confirmer la toxicité des composés en explorant différentes voies d'exposition (c'est-à-dire le contact résiduel et l'ingestion de proies contaminées) et/ou en testant les effets secondaires potentiels envers les insectes parasitoïdes exploités dans les cultures de tomates [13,84,85].

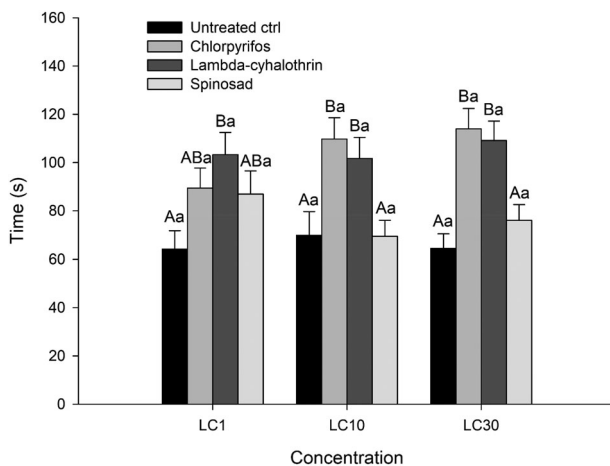


FIGURE 3. Temps moyen ( $\pm$ SE) pris par les femelles de *Nesidiocoris tenuis* pour faire un choix entre les volatiles émis par une plante *Sesamum indicum* ou l'air pur après exposition par contact topique à trois insecticides à trois concentrations faiblement létales et à de l'eau distillée (témoin non traité). Des lettres majuscules différentes indiquent des différences entre les traitements pour une concentration, tandis que des lettres minuscules différentes indiquent des différences dans les concentrations pour un traitement (GLM - distribution binomiale négative, test HSD de Tukey,  $p < 0,05$ ).

## 5 CONCLUSIONS

La toxicité de base a montré que les insecticides étaient toxiques pour les femelles de *N. tenuis*. Les effets sublétaux causés par les concentrations testées des trois insecticides étaient également pertinents. Même à LC1 et LC10, la fertilité des femelles *N. tenuis* a été compromise par tous les insecticides. En outre, des effets sublétaux sur l'orientation des prédateurs ont été observés. Nous avons conclu que les trois insecticides étaient nocifs pour *N. tenuis* et devraient être évités lorsque la présence du prédateur est souhaitable. Néanmoins, des essais field doivent être réalisés pour confirmer leur toxicité sublétale et le risque global (interaction de l'exposition, du danger et d'autres facteurs). En outre, les effets négatifs sur l'orientation de *N. tenuis* observés dans l'étude actuelle fournissent une base pour des recherches ultérieures visant à élucider comment les insecticides neurotoxiques altèrent la capacité de *N. tenuis* à localiser les plantes hôtes ou les proies herbivores, en étudiant les altérations de l'expression génétique des protéines de liaison aux

odorants et des protéines chimiosensorielles qui pourraient être impliquées dans la réception des volatiles végétaux en employant des bioessais électro-antennographiques et de réaction en chaîne par polymérase quantitative en temps réel [86-88]. En outre, les résultats soulignent l'importance d'étudier d'autres insecticides qui pourraient avoir un spectre étroit et qui seraient plus compatibles avec une lutte intégrée durable.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pour le financement personnel de l'auteur (PDSE - Processus n° 88881.187337/2018-2101), la Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) et le Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pour le soutien de LCP; l'Université de Catane (Projet Emergent Pests and Pathogens and Relative Sustainable Strategies 5A722192113; bourse de doctorat à AG), l'UE, Programme IEV de Coopération Transfrontalière Italie-Tunisie 2014-2020 (Projet INTEMAR-IS\_2.1\_073 Innovations dans la lutte intégrée contre les ravageurs et maladies récemment introduits sur les cultures maraîchères, numéro de subvention E64I18002460007). Les auteurs tiennent également à remercier les propriétaires de l'Azienda Agricola La Zagara (Fiumefreddo, Italie) pour avoir partagé leur culture de tomates pour la collecte d'insectes, les étudiants et les techniciens de la section entomologie du Département Agriculture, Alimentation et Environnement de l'Université de Catania qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'exécution de cette expérience.

## RÉFÉRENCES

- 1 Horowitz AR, Ghanim M, Roditakis E, Nauen R and Ishaaya I, Insecticide resistance and its management in *Bemisia tabaci* species. *J Pest Sci* 93:893–910 (2020).
- 2 Sánchez-Bayo F, Indirect effect of pesticides on insects and other arthropods. *Toxics* 9:177 (2021).
- 3 Desneux N, Decourtye A and Delpuech J-M, The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. *Annu Rev Entomol* 52:81–106 (2007).
- 4 Köhler HR and Triebkorn R, Wildlife ecotoxicology of pesticides: can we track effects to the population level and beyond? *Science* 341: 759–765 (2013).
- 5 Biondi A, Zappalà L, Stark JD and Desneux N, Do biopesticides affect the demographic traits of a parasitoid wasp and its biocontrol services through sublethal effects? *PLoS One* 8:e76548 (2013).
- 6 Bueno ADF, Carvalho GA, Santos ACD, Sosa-Gómez DR and Silva DMD, Pesticide selectivity to natural enemies: challenges and constraints for research and field recommendation. *Cienc Rural* 47:1–10 (2017).
- 7 Mansour R, Belzunces LP, Suma P, Zappalà L, Mazzeo G, Grissa-Lebdi K *et al.*, Vine and citrus mealybug pest control based on synthetic chemicals. A review. *Agron Sustain Dev* 38:1–20 (2018).
- 8 Campolo O, Puglisi I, Barbagallo RN, Cherif A, Ricupero M, Biondi A *et al.*, Side effects of two citrus essential oil formulations on a generalist insect predator, plant and soil enzymatic activities. *Chemo-sphere* 257:127252 (2020).
- 9 Menail AH, Boutefnouchet-Bouchema WF, Haddad N, Taning NTC, Smaghe G and Loucif-Ayad W, Effects of thiamethoxam and spinosad on the survival and hypopharyngeal glands of the African honey bee (*Apis mellifera intermissa*). *Entomol Gen* 40:207–215 (2020).
- 10 Stern VMRF, Smith R, Van den Bosch R and Hagen K, The integration of chemical and biological control of the spotted alfalfa aphid: the integrated control concept. *Hilgardia* 29:81–101 (1959).
- 11 Heimpel GE and Mills NJ, *Biological Control*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 380 (2017).
- 12 Rossi Stacconi MV, Amiresmaeili N, Biondi A, Carli C, Caruso S, Dindo ML *et al.*, Biological control of the invasive spotted wing drosophila through augmentative releases of the cosmopolitan parasitoid *Trichopria drosophilae*. *Biol Control* 117:188–196 (2018).
- 13 Campos MR, Monticelli LS, Béarez P, Amiens-Desneux E, Wang Y, Lavoie A-V *et al.*, Impact of a shared sugar food source on biological control of *Tuta absoluta* by the parasitoid *Necremnus tuta*. *J Pest Sci* 93:207–218 (2020).
- 14 Santoiemma G, Tonina L, Marini L, Duso C and Mori N, Integrated management of *Drosophila suzukii* in sweet cherry orchards. *Entomol Gen* 40:297–305 (2020).
- 15 SANCO/10329/2002. Guidance Document on Terrestrial Ecotoxicology under Council Directive 91/414/EEC, Rev.2 Final, pp. 1–39 (2002).
- 16 Barrett KL, Grandy N, Harrison EG, Hassan S and Oomen P, Guidance document on regulatory testing procedures for pesticides and non-target arthropods. ESCORT workshop (European standard characteristics of non-target arthropod regulatory testing). In Wagenin-gen, the Netherlands: a Joint BART, EPPO/CoE and IOBC Workshop Organised in Conjunction with SETAC-Europe and Funded by the EC, 51 p. (1994).
- 17 EFSA Panel on Plant Protection Products and their Residues (PPR), Scientific opinion addressing the state of the science on risk assessment of plant protection products for non-target arthropods. *EFSA J* 13:3996 (2015).
- 18 Desneux N, Fauvergue X, Dechaume-Moncharmont FX, Kerhoas L, Ballanger Y and Kaiser L, *Diaeretiella rapae* limits *Myzus persicae* populations after applications of deltamethrin in oilseed rape. *J Econ Entomol* 98:9–17 (2005).
- 19 Guedes RNC, Smaghe G, Stark JD and Desneux N, Pesticide-induced stress in arthropod pests for optimized integrated pest management programs. *Annu Rev Entomol* 61:43–62 (2016).

- 20 Langhof M, Gathmann A, Poehling HM and Meyhöfer R, Impact of insecticide drift on aphids and their parasitoids: residual toxicity, persistence and recolonisation. *Agric Ecosyst Environ* 94:265–274 (2003).
- 21 Marubayashi RY, Oliveira RBD, Ferreira MDC, Roggia S, EDD M and Saab OJ, Insecticide spray drift reduction with different adjuvants and spray nozzles. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 25:282–287 (2021).
- 22 Biondi A, Desneux N, Siscaro G and Zappalà L, Using organic-certified rather than synthetic pesticides may not be safer for biological control agents: selectivity and side effects of 14 pesticides on the predator *Orius laevigatus*. *Chemosphere* 87:803–812 (2012).
- 23 He Y, Zhao J, Zheng Y, Weng Q, Biondi A, Desneux N et al., Assessment of potential sublethal effects of various insecticides on key biological traits of the tobacco whitefly, *Bemisia tabaci*. *Int J Biol Sci* 9: 246–255 (2013).
- 24 Dai C, Ricupero M, Puglisi R, Lu Y, Desneux N, Biondi A et al., Can contamination by major systemic insecticides affect the voracity of the harlequin ladybird? *Chemosphere* 256:126986 (2020).
- 25 Passos LC, Soares MA, Collares LJ, Malagoli I, Desneux N and Carvalho GA, Lethal, sublethal and transgenerational effects of insecticides on *Macrolophus basicornis*, predator of *Tuta absoluta*. *Entomol Gen* 38:127–143 (2018).
- 26 Soares MA, Campos MR, Passos LC, Carvalho GA, Haro MM, Lavoit AV et al., Botanical insecticide and natural enemies: a potential combination for pest management against *Tuta absoluta*. *J Pest Sci* 92: 1433–1443 (2019).
- 27 Arnó J and Gabarra R, Side effects of selected insecticides on the *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) predators *Macrolophus pygmaeus* and *Nesidiocoris tenuis* (Hemiptera: Miridae). *J Pest Sci* 84: 513–520 (2011).
- 28 Wanumen AC, Sánchez-Ramos I, Viñuela E, Medina P and Adán Á, Impact of feeding on contaminated prey on the life parameters of *Nesidiocoris tenuis* (Hemiptera: Miridae) adults. *J Insect Sci* 16:1–7 (2016).
- 29 Jaworski CC, Bompard A, Genies L, Amiens-Desneux E and Desneux N, Preference and prey switching in a generalist predator attacking local and invasive alien pests. *PLoS One* 8:1–10 (2013).
- 30 Biondi A, Guedes RNC, Wan F-H and Desneux N, Ecology, worldwide spread, and management of the invasive south American tomato pinworm, *Tuta absoluta*: past, present, and future. *Annu Rev Entomol* 63:239–258 (2018).
- 31 Van Lenteren JC, Lanzoni A, Hemerik L, Bueno VHP, Bajonero Cuervo JG, Biondi A et al., The pest kill rate of thirteen natural enemies as aggregate evaluation criterion of their biological control potential of *Tuta absoluta*. *Sci Rep* 11:10756 (2021).
- 32 Desneux N, Han P, Mansour R, Arnó J, Brévault T, Campos MR et al., Integrated pest management of *Tuta absoluta*: practical implementations across different world regions. *J Pest Sci* 95:17–39 (2022).
- 33 Zappalà L, Biondi A, Alma A, Al-Jboory IJ, Arnó J, Bayram A et al., Natural enemies of the south American moth, *Tuta absoluta*, in Europe, North Africa and Middle East, and their potential use in pest control strategies. *J Pest Sci* 86:635–647 (2013).
- 34 Jaworski CC, Chailleux A, Bearez P and Desneux N, Apparent competition between major pests reduces pest population densities on tomato crop, but not yield loss. *J Pest Sci* 88:793–803 (2015).
- 35 Naselli M, Urbaneja A, Siscaro G, Jaques JA, Zappalà L, Flors V et al., Stage-related defense response induction in tomato plants by *Nesidiocoris tenuis*. *Int J Mol Sci* 17:1210 (2016).
- 36 Mansour R, Brévault T, Chailleux A, Cherif A, Grissa-Lebdi K, Haddi K et al., Occurrence, biology, natural enemies and management of *Tuta absoluta* in Africa. *Entomol Gen* 38:83–112 (2018).
- 37 Thomine E, Jeavons E, Rusch A, Bearez P and Desneux N, Effect of crop diversity on predation activity and population dynamics of the mirid predator *Nesidiocoris tenuis*. *J Pest Sci* 93:1255–1265 (2020).
- 38 Thomine E, Rusch A, Supplisson C, Monticelli LS, Amiens-Desneux E, Lavoit AV et al., Highly diversified crop systems can promote the dispersal and foraging activity of the generalist predator *Harmonia axyridis*. *Entomol Gen* 40:133–145 (2020).
- 39 Castañe C, Arnó J, Gabarra R and Alomar O, Plant damage to vegetable crops by zoophytophagous mirid predators. *Biol Control* 59:22–29 (2011).
- 40 Mollá O, Biondi A, Alonso-Valiente M and Urbaneja A, A comparative life history study of two mirid bugs preying on *Tuta absoluta* and *Ephesttia kuehniella* eggs on tomato crops: implications for biological control. *BioControl* 59:175–183 (2014).
- 41 Siscaro G, Pumo CL, Garzia GT, Tortorici S, Gugliuzzo A, Ricupero M et al., Temperature and tomato variety influence the development and the plant damage induced by the zoophytophagous mirid bug *Nesidiocoris tenuis*. *J Pest Sci* 92:1049–1056 (2019).
- 42 Campos MR, Biondi A, Adiga A, Guedes RNC and Desneux N, From the Western Palaearctic region to beyond: *Tuta absoluta* ten years after invading Europe. *J Pest Sci* 90:787–796 (2017).
- 43 Ferracini C, Bueno VH, Dindo ML, Ingegno BL, Luna MG, Salas Gervassio NG et al., Natural enemies of *Tuta absoluta* in the Mediterranean basin, Europe and South America. *Biocontrol Sci Tech* 29:578–609 (2019).
- 44 Mansour R and Biondi A, Releasing natural enemies and applying microbial and botanical pesticides for managing *Tuta absoluta* in the MENA region. *Phytoparasitica* 49:179–194 (2021).
- 45 Pérez-Hedo M, Alonso-Valiente M, Vacas S, Gallego C, Rambla JL, Navarro-Llopis V et al., Eliciting tomato plant defenses by exposure to herbivore induced plant volatiles. *Entomol Gen* 41:209–218 (2021).
- 46 Madbouni MAZ, Samih MA, Qureshi JA, Biondi A and Namvar P, Compatibility of insecticides and fungicides with the zoophytophagous mirid predator *Nesidiocoris tenuis*. *PLoS One* 12:e0187439 (2017).
- 47 Soares MA, Carvalho GA, Campos MR, Passos LC, Haro MM, Lavoit AV et al., Detrimental sublethal effects hamper the effective use of natural and chemical pesticides in combination with a key natural enemy of *Bemisia tabaci* on tomato. *Pest Manag Sci* 76:3551–3559 (2020).
- 48 Biondi A, Zappalà L, Di Mauro A, Tropea Garzia G, Russo A, Desneux N et al., Can alternative host plant and prey affect phytophagy and biological control by the zoophytophagous mirid *Nesidiocoris tenuis*? *BioControl* 61:79–90

(2016).

- 49 Tan Y, Biondi A, Desneux N and Gao XW, Assessment of physiological sublethal effects of imidacloprid on the mirid bug *Apolygus lucorum* (Meyer-Dür). *Ecotoxicology* 21:1989–1997 (2012).
- 50 Naselli M, Zappala L, Gugliuzzo A, Garzia GT, Biondi A, Rapisarda C et al., Olfactory response of the zoophytophagous mirid *Nesidiocoris tenuis* to tomato and alternative host plants. *Arthropod-Plant Interactions* 11:121–131 (2017).
- 51 Finney DJ, *Probit Analysis; A Statistical Treatment of the Sigmoid Response Curve*. Macmillan, Oxford, England, 256 p. (1947).
- 52 Shapiro SS and Wilk MB, An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52:591–611 (1965).
- 53 Bartlett MS, Properties of sufficiency and statistical tests. *Proc R Soc Lond A* 160:268–282 (1937).
- 54 Nelder JA and Wedderburn RWM, Generalized Linear Models. *J Roy Statistic Soc* 135:370–384 (1972).
- 55 Fox J and Weisberg S, *An R Companion to Applied Regression*, Third edn. Sage, Thousand Oaks, CA (2019).
- 56 Venables WN and Ripley BD, *MASS: Modern Applied Statistics with S*, Fourth edn. Springer, New York (2002).
- 57 Hothorn T, Bretz F and Westfall P, Simultaneous inference in general parametric models. *Biom J* 50:346–363 (2008).
- 58 Yu SJ, *The Toxicology and Biochemistry of Insecticides*. CRC Press, Boca Raton, FL, p. 276 (2008).
- 59 Casida JE and Durkin KA, Neuroactive insecticides: targets, selectivity, resistance, and secondary effects. *Annu Rev Entomol* 58:99–117 (2013).
- 60 Carvalho GA, Grützmacher AD, Passos LC and Oliveira RL, Physiological and ecological selectivity of pesticides for natural enemies of insects, in *Natural Enemies of Insect Pests in Neotropical Agroecosystems*, ed. by Souza B, Vásquez L and Marucci R. Springer, Cham, Switzerland, pp. 469–478 (2019).
- 61 Torres JB and Bueno ADF, Conservation biological control using selective insecticides – a valuable tool for IPM. *Biol Control* 126:53–64 (2018).
- 62 Mollá O, González-Cabrera J and Urbaneja A, The combined use of *Bacillus thuringiensis* and *Nesidiocoris tenuis* against the tomato borer *Tuta absoluta*. *BioControl* 56:883–891 (2011).
- 63 Desneux N, Pham-Delègue M and Kaiser L, Effects of sub-lethal and lethal doses of lambda-cyhalothrin on oviposition experience and host-searching behaviour of a parasitic wasp, *Aphidius ervi*. *Pest Manag Sci* 60:381–389 (2004).
- 64 Eijaza S, Khan MF, Mahmood K, Anwar M, Alamgir A and Khatri I, Studies on degradation and efficacy of synthetic pesticides on okra crop. *Acad J Entomol* 8:12–18 (2015).
- 65 Ricupero M, Desneux N, Zappalà L and Biondi A, Target and non-target impact of systemic insecticides on a polyphagous aphid pest and its parasitoid. *Chemosphere* 247:125728 (2020).
- 66 Wang R, Zheng H, Qu C, Wang Z, Kong Z and Luo C, Lethal and sublethal effects of a novel cis-nitromethylene neonicotinoid insecticide, cycloxaprid, on *Bemisia tabaci*. *Crop Prot* 83:15–19 (2016).
- 67 Fernandes ME, Alves FM, Pereira RC, Aquino LA, Fernandes FL and Zanuncio JC, Lethal and sublethal effects of seven insecticides on three beneficial insects in laboratory assays and field trials. *Chemosphere* 156:45–55 (2016).
- 68 Wang S, Qi Y, Desneux N, Shi X, Biondi A and Gao X, Sublethal and transgenerational effects of short-term and chronic exposures to the neonicotinoid nitenpyram on the cotton aphid *Aphis gossypii*. *J Pest Sci* 90:389–396 (2017).
- 69 Vojoudi S, Saber M, Hejazi MJ and Talaei-Hassanloui R, Toxicity of chlorpyrifos, spinosad and abamectin on cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* and their sublethal effects on fecundity and longevity. *Bull Insectol* 64:189–193 (2011).
- 70 Messing R and Croft BA, Sublethal influences, in *Arthropod Biological Control Agents and Pesticides*, ed. by Croft BA. John Wiley and Sons, New York, pp. 157–183 (1990).
- 71 Biondi A, Zappala L, Desneux N, Aparo A, Siscaro G, Rapisarda C et al., Potential toxicity of  $\alpha$ -cypermethrin-treated nets on *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae). *J Econ Entomol* 108:1191–1197 (2015).
- 72 Gholamzadeh-Chitgar M, Hajizadeh J, Ghadamyari M, Karimi-Malati A and Hoda H, Effects of sublethal concentration of diazinon, fenitrothion and chlorpyrifos on demographic and some biochemical parameters of predatory bug, *Andrallus spinidens* Fabricius (Hemiptera: Pentatomidae) in laboratory conditions. *Int J Pest Manag* 61:204–211 (2015).
- 73 Ricupero M, Abbas K, Haddi K, Kurtulus A, Desneux N, Russo A et al., Combined thermal and insecticidal stresses on the generalist predator *Macrolophus pygmaeus*. *Sci Total Environ* 729:138922 (2020).
- 74 Kim DS, Brooks DJ and Riedl H, Lethal and sublethal effects of abamectin, spinosad, methoxyfenozide and acetamiprid on the predaceous plant bug *Deraeocoris brevis* in the laboratory. *Biocontrol* 51:465–484 (2006).
- 75 Biondi A, Mommaerts V, Smagghe G, Viñuela E, Zappalà L and Desneux N, The non-target impact of spinosyns on beneficial arthropods. *Pest Manag Sci* 68:1523–1536 (2012).
- 76 Khambay BPS and Jewess PJ, Pyrethroids, in *Insect Control – Biological and Synthetic Agents*, ed. by Gilbert LI and Gill SS. Academic Press, London, UK, pp. 1–29 (2010).
- 77 D’Ávila VA, Barbosa WF, Guedes RN and Cutler GC, Effects of spinosad, imidacloprid, and lambda-cyhalothrin on survival, parasitism, and reproduction of the aphid parasitoid *Aphidius colemani*. *J Econ Entomol* 111:1096–1103 (2018).
- 78 Sharifian I, Sabahi Q and Bandani AR, Effect of some conventional insecticides on functional response parameters of *Macrolophus pygmaeus* (hem.: Miridae) on *Tuta absoluta* (Lep.: Gelechiidae). *Bihar Biol* 11:10–14 (2017).
- 79 Barbosa WF, Tomé HV, Bernardes RC, Siqueira MA, Smagghe G and Guedes RN, Biopesticide-induced behavioral and morphological alterations in the stingless bee *Melipona quadrifasciata*. *Environ Toxicol Chem* 34:2149–2158 (2015).

- 80 Crouse GD, Sparks TC, Schoonover J, Gifford J, Dripps J, Bruce T et al., Recent advances in the chemistry of spinosyns. *Pest Manag Sci* 57: 177–185 (2011).
- 81 Sparks TC, Crouse GD and Durst G, Natural products as insecticides: the biology, biochemistry and quantitative structure-activity relationships of spinosyns and spinosoids. *Pest Manag Sci* 57:896–905 (2001).
- 82 Salgado VL and Sparks TC, The Spinosins: chemistry, biochemistry, mode of action, and resistance, in *Insect Control – Biological and Synthetic Agents*, ed. by Gilbert LI and Gill SS. Academic Press, London, UK, pp. 207–243 (2010).
- 83 Zhang X, Xu Q, Lu W and Liu F, Sublethal effects of four synthetic insecticides on the generalist predator *Cyrtorhinus lividipennis*. *J Pest Sci* 88:383–392 (2015).
- 84 El-Arnaouty SA, Galal HH, Afifi V, Beyssat J, Pizzol J, Desneux N et al., Assessment of two *Trichogramma* species for the control of *Tuta absoluta* in north African tomato greenhouses. *Afric Entomol* 22: 801–809 (2014).
- 85 Salas Gervassio NG, Aquino D, Vallina C, Biondi A and Luna MG, A re-examination of *Tuta absoluta* parasitoids in South America for optimized biological control. *J Pest Sci* 92:1343–1357 (2019).
- 86 Ingegno BL, La-Spina M, Jordan MJ, Tavella L and Sanchez JA, Host plant perception and selection in the sibling species *Macrolophus melanotoma* and *Macrolophus pygmaeus* (Hemiptera: Miridae). *J Insect Behav* 29:117–142 (2016).
- 87 Zhang R, Gao G and Chen H, Silencing of the olfactory co-receptor gene in *Dendroctonus armandi* leads to EAG response declining to major host volatiles. *Sci Rep* 6:23136 (2016).
- 88 Wang GY, Zhu MF, Jiang YD, Zhou WW, Liu S, Heong KL et al., Identification of candidate odorant-binding protein and chemosensory protein genes in *Cyrtorhinus lividipennis* (Hemiptera: Miridae), a key predator of the rice planthoppers in Asia. *Environ Entomol* 46:654–662 (2017).



Programme cofinancé par l'Union Européenne



Repubblica Italiana



République tunisienne



Regione Siciliana

Projet cofinancé par l'Union européenne dans le cadre du Programme IEV de Coopération Transfrontalière Italie-Tunisie 2014-2020 (Project INTEMAR-IS\_2.1\_073 "Innovations dans la lutte intégrée contre les ravageurs et maladies récemment introduits sur cultures maraîchères" CUP E64I18002460007