

# Effets sublétaux des huiles essentielles de plantes sur le miride zoophytophage *Nesidiocoris tenuis*

Luis C. Passos<sup>1,2+</sup>, Michele Ricupero<sup>1+</sup>, Antonio Gugliuzzo<sup>1+</sup>, Marianne A Soares<sup>2</sup>, Nicolas Desneux<sup>3</sup>, Orlando Campolo<sup>4</sup>, Geraldo A Carvalho<sup>2</sup>, Antonio Biondi<sup>1\*</sup>, Lucia Zappalá<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Agriculture, Food and Environment, University of Catania, Via Santa Sofia 100, 95123, Catania, Italy

<sup>2</sup>Laboratório de Ecotoxicologia e MIP, Departamento de Entomologia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG CEP 37200-900, Brazil

<sup>3</sup>Université Côte d'Azur, INRAE, CNRS, UMR ISA, Nice, 06000, France

<sup>4</sup>University of Reggio Calabria, Department of Agriculture, Feo di Vito, 89122 Reggio Calabria, Italy

+ Ces auteurs ont contribué à parts égales \*auteur correspondant

This document is a translated French version of the article (<https://doi.org/10.1007/s10340-022-01548-7>). 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 (<https://doi.org/10.1007/s10340-022-01548-7>). Les auteurs déclinent toute responsabilité pour toute erreur de traduction par rapport à la version originale.

## Résumé

Les prédateurs hémiptères zoophytophages fournissent des services de contrôle biologique pertinents et leurs applications sont consolidées dans la gestion des ravageurs en serre. L'utilisation d'huiles essentielles (EOs) de plantes pour la protection durable des cultures est actuellement encouragée. Actuellement encouragée. Cependant, une connaissance plus approfondie des effets secondaires potentiels des EOs sur les mirides prédateurs (Hemiptera : Miridae) est nécessaire. Ici, nous avons évalué l'impact non ciblé de quatre EOs (anis, fenouil, ail et lavande) sur le prédateur généraliste *Nesidiocoris tenuis* (Reuter) en laboratoire. La toxicité de base des EOs a été firstly évaluée sur les adultes de *N. tenuis* après une exposition topique par contact. Ensuite, le comportement de reproduction et d'orientation du prédateur a été testé après l'exposition à trois concentrations létales E0 estimées (LC1, LC<sub>0</sub> et LCM). L'ail EO avait les LC estimées les plus basses (par exemple, LC<sub>30</sub> 1,34 mg mL<sup>-1</sup>), étant ainsi le composé le plus toxique parmi les EOs testées. Les LC<sub>30</sub> estimées pour les EOs de lavande, d'anis et de fenouil étaient de 2,5 mg mL<sup>-1</sup>. de fenouil étaient respectivement de 2,75, 4,55 et 5,17 mg mL<sup>-1</sup>. La fertilité et le comportement d'orientation des femelles de *N. tenuis* ont été négativement affectés par toutes les EOs à la plus forte concentration testée. Néanmoins, l'EOs d'anis aux concentrations LC<sub>1</sub> et LC<sub>0</sub> n'a causé aucun effet sublétal sur *N. tenuis*. effets sublétaux sur *N. tenuis*. Nos findings suggèrent qu'une attention particulière doit être accordée lorsque les EOs sont utilisées en combinaison avec *N. tenuis* dans la lutte antiparasitaire. avec *N. tenuis* dans les programmes de lutte antiparasitaire.

## Introduction

L'utilisation de prédateurs hémiptères zoophytophages est une pratique consolidée pour le contrôle biologique des ravageurs agricoles (Thomine et al. 2020 ; Pérez-Hedo et al. 2021a ; van Lenteren et al. 2021). Leur rôle en tant qu'éliciteurs de défense des plantes a également été récemment exploité dans plusieurs

systèmes horticoles (Pérez-Hedo et al. 2021b). Parmi les punaises prédatrices mirid (Hemiptera : Miridae), *Nesidiocoris tenuis* (Reuter) est utilisé pour supprimer les populations d'arthropodes nuisibles dans les cultures protégées méditerranéennes car il peut habiter spontanément diverses cultures ou être facilement acheté dans des bio-facteurs pour des lâchers augmentatifs (Castafié et al. 2011 ; Calvo et al. 2012 ; Zappala et al. 2013 ; Naselli et al. 2017). Le miride a la capacité d'être hautement prédateur et la capacité de survivre sur les plantes lorsque les proies sont rares, bien que des dommages aux plantes puissent se produire en raison de son herbivorie se produisant à des niveaux de population élevés et des températures croissantes (Madbouni et al. 2017 ; Siscaro et al. 2019 ; Ingegno et al. 2021). Malgré cet aspect controversé, *N. tenuis* est couramment utilisé dans les cultures de tomates comme agent de biocontrôle contre les mineuses, les whiteflies et les tétranyques (Biondi et al. 2016). En fait, l'introduction de l'oxyure de la tomate sud-américaine, *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera : Gelechiidae), en Méditerranée est devenue l'un des principaux objectifs des lâchers de *N. tenuis* dans les cultures de tomates, car ce ravageur invasif peut causer de graves pertes de rendement dans la tomate (Biondi et al. 2018 ; Desneux et al. 2021 ; Mansour et Biondi 2021). La gestion conventionnelle des arthropodes nuisibles repose souvent sur des applications répétées de pesticides synthétiques qui ont fréquemment des effets néfastes sur les organismes non ciblés, tels que physiologiques et comportementaux (Desneux et al. 2007). En tant qu'alternative écologique, les plantes ont été reconnues comme des outils efficaces de lutte contre les ravageurs, les huiles essentielles (EOs) des plantes étant leur catégorie la plus mise en avant (Regnault-Roger et al. 2012 ; Rathore 2017). Les EOs sont des métabolites secondaires des plantes constitués de composés volatils et semi-volatils impliqués dans les mécanismes de défense contre les facteurs biotiques et abiotiques (Walling 2000 ; Hare 2011 ; Miresmailli et Isman 2014). Avec une faible toxicité envers les mammifères et une persistance négligeable dans l'environnement, les EOs ont été de plus en plus suggérées pour une application dans les programmes biologiques et IPM (Campolo et al. 2017 ; Giunti et al. 2019 ; Pavela et al. 2020). Malgré leurs bénéfices potentiels, les EOs présentent des inconvénients constitutifs liés à leurs propriétés, comme la phytotoxicité, la faible solubilité dans l'eau, la volatilité élevée et la dégradation rapide (Moretti et al. 2002 ; Regnault-Roger et al. 2012 ; Krzykowski et al. 2020). Néanmoins, les récentes avancées en nanotechnologie permettent de remédier à ces inconvénients par une libération constante des principes actifs, une réduction de l'impact sur l'environnement et une réduction des coûts. libération constante des principes actifs, une réduction de la dégradation, et en améliorant leur solubilité et leur stabilité (Kah et al. 2013 ; dc Oliveira et al. 2014 ; Campolo et al. 2017, 2020a ; Maroofpour et al. 2021 ; Cherif et al. 2022). L'intégration entre les EOs et le prédateur *N. tenuis* peut être une stratégie intéressante pour améliorer l'efficacité de la gestion des arthropodes nuisibles dans les serres. Gestion efficace des arthropodes ravageurs des serres, tels que *T. absoluta*. Cependant, l'activité insecticide des EOs pourrait également être nocive pour *N. tenuis* en provoquant des effets létaux et sublétaux, tels que la réduction des paramètres de croissance de la population et de la capacité de contrôle biologique (Scares et al. 2019). En fait, les EOs ont souvent une activité à large spectre, entraînant une mortalité directe des insectes ou des effets secondaires, tels qu'un comportement antiféminateur et/ou un comportement répulsif, la dissuasion de la ponte et la régulation de la croissance, tant pour les ravageurs que pour les organismes bénéficiales, tels que les pollinisateurs et les agents de contrôle biologique (Isman et Tak 2017 ; Rathore 2017 ; Kim et al. 2021). Bien que de nombreuses études aient porté sur la bioactivité des EOs (2022), des connaissances limitées sur l'effet non cible des EOs envers les arthropodes bénéficiales ont été produites. Des études antérieures en laboratoire ont évalué l'impact non ciblé des EOs de *Citrus* spp, *Mentha pulegium* L. et ail (*Allium sativum* L.) sur *N. tenuis* en termes de toxicité aiguë et d'elfes sublétaux (Papadimitriou et al. 2019 ; Soares et al. 2019 ; Campolo et al. 2020b ; Ricupero et al. 2022). La plupart de ces études ont évalué l'effet secondaire des EO en testant la dose recommandée sur l'étiquette des ravageurs ou les concentrations létales (LCs) estimées sur le ravageur cible. Cependant, il y a un manque de données concernant la relation dose-réponse des EOs sur *N. tenuis* et leurs effets à faibles concentrations (c'est-à-dire qui provoquent une faible mortalité) sur la fertilité et la capacité d'orientation de ce prédateur. L'objectif de cette étude était d'évaluer en laboratoire la toxicité de base causée par différentes concentrations de quatre EOs commerciales sur le prédateur *N. tenuis*. Nous avons également

Nous avons également étudié la réponse comportementale et physiologique du prédateur sous l'effet de l'EO du prédateur sous l'effet de ces composés en faibles concentrations.

## Matériel et méthodes

### Matériel biologique

Les individus de *N. tenuis* utilisés dans les bio-essais ont été obtenus en élevage de laboratoire selon la méthodologie décrite par Passos et al. (2022). Des adultes de *N. tenuis* (~ 150 individus) ont été maintenus dans des cages entomologiques (32x40x70 cm) recouvertes de mailles de filet fine. Des plantules en pot (-30 cm de haut) de *Sesamum indicum* L. (variété T-85 Humera) ont été ajoutées aux cages comme sources d'eau et de ponte, et le mélange commercial d'œufs de la proie alternative *Ephestia kuehniella* Zeller (Lepidoptera : Pyralidae) et de kystes d'*Arremia* spp. (c'est-à-dire Entofeed®, Koppert, Pays-Bas) a été offert ad libitum aux prédateurs (réparti sur les feuilles) comme source de nourriture supplémentaire (Biondi et al. 2016). Les individus ont été maintenus dans des cages entomologiques pendant trois jours pour l'accouplement et la ponte, puis ils ont été collectés avec un aspirateur mécanique et transférés dans de nouvelles cages comme décrit précédemment. Les semis de sésame contenant des œufs de *N. tenuis* ont été conservés dans les cages pour l'éclosion des œufs et le développement des nymphes nouvellement écloses jusqu'à l'âge adulte. L'élevage des insectes et les expériences ont été réalisés dans des conditions contrôlées en laboratoire (25 ± 1 °C, 55 ± 5% RH, et 14L: 10D photopériode) au Département de l'Agriculture, d'Agriculture, Alimentation et Environnement de l'Université de Catania (Italie).

### Préparation et caractérisation des nanoémulsions d'EO

Des EO commerciales de qualité alimentaire d'anis (*Pimpinella anisum* L. Apiaceae), de fenouil (*Foeniculum vulgare* Mill.-Apiaceae), de lavande (*Lavandula angustifolia* Miler.-Lamiaceae) et d'ail (*A. sativum*) ont été utilisées pour développer des nanoémulsions insecticides de qualité alimentaire (Esperis s.p.a. Milano, Italie) ont été utilisées pour développer des nanoémulsions insecticides. Pour les procédures analytiques complètes et la caractérisation chimique (analyses GC/FID et GC/MS) des EO d'anis, de fenouil et de lavande, voir Campolo et al. (2020 a), et pour l'EO d'ail, voir Ricupero et al. (2022). Toutes les nanoémulsions à base d'EO développées ont été obtenues en suivant les procédures proposées par Giunti et al (2019). En détail, 15% de chaque EO et 5% de Tween 80 (w/w) ont été mélangés pendant 30 min (8000 RPM) à l'aide d'un agitateur magnétique ; puis de l'eau distillée (80%) a été ajoutée goutte à goutte (1 ml. X min 1) et ensuite agitée pendant 60 min. Afin de réduire la taille des particules et d'améliorer la stabilité, les émulsions brutes obtenues ont ensuite été soniquées pendant 5 minutes à l'aide d'un homogénéisateur à immersion ultrasonique UP200ST (Hielscher®, Teltow, Allemagne) à une puissance de 100 W (fréquence : 26 kHz) (Campolo et al. 2020 a). La caractérisation physique des formulations développées a été effectuée par un appareil de diffusion dynamique de la lumière (DLS) (Zetasizer Nano, Malvern). La qualité et la stabilité dans le temps des nanoformulations développées à base de EO ont été évaluées par la mesure des paramètres suivants : dimension des gouttelettes, exprimée en termes de taille moyenne Z (nm), indice de polydispersité (PDI) et potentiel zêta (charge de surface des gouttelettes exprimée en mV).

### Toxicité de base des EOs envers les femelles de *Nesidiocoris tenuis*

L'essai biologique de concentration-mortalité visait à évaluer la toxicité de contact topique des EOs d'anis, de fenouil, de lavande et d'ail sur les femelles adultes de *Nesidiocoris tenuis*. Les femelles de *Nesidiocoris tenuis* ont été exposées par voie topique de five à six dilutions en série de dilutions de chaque EOs complètement dispersées dans une solution d'eau distillée. Les dilutions d'EOs ont été choisies en fonction d'observations préliminaires visant à identifier la concentration minimale

nécessaire pour provoquer une mortalité de 100 % des femelles *N. tenuis* et la concentration maximale qui ne provoque aucune mortalité de manière similaire au contrôle non traité. En outre, une solution mère contenant 15 % d'EO (c'est-à-dire une nanoémulsion concentrée) a été utilisée comme concentration maximale, et un témoin non traité contenant uniquement de l'eau distillée a été inclus pour tous les traitements en tant que "concentration zéro". Pour l'essai biologique, des femelles *N. tenuis* (âgées de 2 jours) provenant de l'élevage en laboratoire ont été isolées en groupes de five individus dans des tubes coniques ventilés en plastique (Falcon®-50 mL) et maintenues à basse température (~ 8 °C) à l'intérieur d'une boîte de thermie box contenant des packs de glace pendant 3 h afin de réduire leur mobilité. Ensuite, chaque groupe de femelles *N. tenuis* a été placé dans un gobelet en plastique (100 mL) et immédiatement pulvérisé avec 2 mL de chaque concentration de solutions d'EOs à l'aide d'un pulvérisateur manuel (50 mL). La partie intérieure des gobelets en plastique a été recouverte de papier absorbant pour éviter la formation de gouttelettes de solution et la noyade potentielle des insectes pulvérisés. Le papier absorbant a été remplacé entre les répétitions pour chaque concentration d' EO. Après la pulvérisation, chaque groupe de femelles *N. tenuis* a été transféré dans une arène acrylique ventilée (5,5 cm de diamètre, 3 cm ht) contenant Entofood® (dispersé sur l'arène) et un disque de feuille de courgette (3 cm de diamètre) comme sources de nourriture et d'eau. Le nombre de femelles mortes a été enregistré après 48 h. Chaque arène contenant five femelles *N. tenuis* a été considérée comme une réplique et l'expérience a été répétée huit fois pour chaque concentration d'EO testée et le contrôle non traité.

## Effets des EOs sur la fertilité de *Nesidiocoris tenuis*

Ce bio-essai visait à évaluer si des concentrations décroissantes d'EOs déterminées précédemment peuvent affecter la production de progéniture des femelles de *N. tenuis*. Les prédateurs ont été exposés à LC1, LC10, et LC30, d'EOs d'anis, de fenouil, de lavande et d'ail afin d'émuler un scénario potentiel de field dans lequel différentes concentrations d'insecticides peuvent se produire dans le field après la dégradation de l'environnement, y compris une gamme létale de mortalité négligeable (CL1) à une mortalité modérée (CL30). Des adultes de *Nesidiocoris tenuis* (âgés de 2 jours) ont été pulvérisés avec des insecticides de type LC1, LC 10 et LC30 d'EOs d'anis, de fenouil, de lavande et d'ail selon le même procédé décrit précédemment dans "Baseline toxicity of EOs toward *Nesidiocoris tenuis* females". Ensuite, chaque mâle et chaque femelle de *N. tenuis* ont été placés dans une arène ventilée (400 mL) contenant 1 g d'œufs d'*E. kuehniella* comme source de nourriture et une cosse de haricot vert (*Phaseolus vulgaris* L., cv. "Garrafal enana") comme substrat de ponte (Passos et al. 2022). Les couples de *Nesidiocoris tenuis* ont été maintenus dans les arènes expérimentales pour s'accoupler avec succès et permettre aux femelles de pondre dans les gousses de haricot vert. Après 3 jours, les adultes IV. *tenuis* ont été retirés des arènes. Les cosses de haricots verts portant des œufs de *N. tenuis* ont donc été maintenues dans les conditions de laboratoire contrôlées décrites ci-dessus. Environ dix jours après, les nymphes de *N. tenuis* nouvellement émergées ont été comptées quotidiennement (= fertilité) et retirées avec un pinceau doux sous le stéréomicroscope. L'évaluation a été menée pendant 20 jours jusqu'à ce qu'aucune nymphe n'émerge. Pour chaque combinaison de concentration d'EO et pour le témoin, la fertilité de 25 femelles *N. tenuis* (chaque femelle étant une réplique) a été évaluée.

### Effets des EOs sur l'orientation de *Nesidiocoris tenuis*

Le but de ce bio-essai était d'évaluer les effets potentiels des EOs à des concentrations faiblement létales sur la capacité d'orientation des femelles de *N. tenuis*. Pour cela, des femelles adultes (~ 2 jours) ont été exposées topiquement à des CL1, LC10, et LC30 d'EOs d'anis, de fenouil, de lavande et d'ail selon la même méthodologie décrite dans "Baseline toxicity of EOs toward *N. tenuis* females". Briefly, les femelles de *N. tenuis* prélevées dans l'élevage ont été affamées pendant 24 h dans des flacons transparents avec un tampon de coton humidifié comme source d'eau. Ainsi, après avoir reçu une pulvérisation topique, chaque femelle *N. tenuis* a été transférée individuellement dans un olfactomètre à deux voies (bras principal et bras latéraux de 15 cm de long et de 4 cm de diamètre interne) et observée. Les sources d'odeur étaient l'air pur et une

plante de sésame (~ 20 cm de hauteur), car des études antérieures ont rapporté une forte attractivité de cette espèce végétale pour *N. tenuis* (Biondi et al. 2016). La plante de sésame a été placée à l'intérieur de l'un des bocal en verre cylindriques (5 L) reliés aux bras latéraux de l'olfactomètre. Une pompe à air (Airfizz®, Ferplast, Italie) a produit un flow unidirectionnel (150 mL·min<sup>-1</sup>) qui a traversé 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 le bras principal. L'olfactomètre était placé verticalement sur la surface du banc et éclairé par des lampes fluorescentes 22 W cool-white positionnées à 80 cm au-dessus. Les observations ont été réalisées entre 9:00 a.m. et 6:00 p.m. dans une pièce sombre dans les conditions de laboratoire susmentionnées. Les conditions de laboratoire susmentionnées. L'olfactomètre a été inversé pour éliminer l'interférence de l'environnement sur la réponse des insectes toutes les deux répétitions. L'olfactomètre et les bocaux en verre ont été nettoyés avec de l'acétone de qualité pure entre les EO testées et leurs différentes concentrations. Chaque femelle *N. tenuis* a été observée pendant 5 minutes et le temps passé par le prédateur à choisir entre les sources d'odeur a été enregistré.

sources d'odeur a été enregistré. Le choix était considéré comme valide lorsque chaque femelle *N. tenuis* raversait les 2/3 du bras latéral. Pour chaque combinaison d'EO et de concentration, 30 répliques valides, c'est-à-dire des femelles qui ont fait un choix pendant les 5 min d'observation, ont été considérées.

## Analyses statistiques

Les variables dépendantes (c'est-à-dire les données relatives à la mortalité, à la fertilité et à la réponse olfactive) ont été vérifiées quant à la normalité de la variance et à l'hétéroscédasticité au moyen du test de Shapiro et du test de Wilk, respectivement, et l'ensemble des données a été log-transformé lorsque cela était nécessaire. La toxicité de base des EO d'anis, de fenouil, de lavande et d'ail sur *N. tenuis* par exposition topique de contact a été déterminée par un modèle de régression log-probit. Les relations concentration-mortalité ont été considérées comme valides lorsqu'aucun écart significatif ne s'est produit entre les valeurs observées et les valeurs attendues au niveau  $p < 0,05$ . La préférence des femelles *N. tenuis* qui ont fait un choix entre la plante de sésame et l'air pur a été analysée par le chi-carré de goodness-of-fit pour déterminer si le comportement d'orientation vers chaque source d'odeur divergeait d'une distribution égale (50:50). L'effet des facteurs "EO", "Concentration" et de leur interaction "EO" > "Concentration" sur les données de mortalité, de fertilité et de temps passé a été analysé par un modèle linéaire généralisé (GLM). Les moyennes ont été séparées par un test post-hoc Tukey HSD. Les analyses Probit ont été effectuées dans IBM® SPSS® Statistics for Macintosh, version 23.0.0.0 (IBM Corp. Released 2015. Armonk, NY : IBM Corp SPSS v. 21.0). Les analyses statistiques pour les données de fertilité et de réponse olfactive ont été réalisées dans " R " 3.6.0 (R Core Team 2019), en utilisant les paquets " car " et " MASS " pour le fitting de modèles et le paquet " multcomp " pour séparer les moyennes.

## Résultats

### Toxicité de base des EO pour les femelles de *Nesidiocoris tenuis*

Les modèles Probit s'ajustent aux données observées pour tous les traitements ( $p > 0,05$ ), validant la courbe concentration-réponse et donc l'estimation des concentrations faiblement létales pour toutes les EO (tableau 1). Au cours de la période d'évaluation, aucune mort n'a été enregistrée chez les insectes traités uniquement avec de l'eau distillée (" concentration zéro "). Les concentrations létales les plus faibles ont été estimées pour l'EO d'ail, qui présentait donc la toxicité la plus élevée pour les femelles de *N. tenuis*. Les LC1 et LC10 les plus élevées ont été estimées pour l'EO d'anis, tandis que la LC30 la plus élevée a été enregistrée pour l'EO de fenouil.

Essential oil	Slope $\pm$ SE	$\chi^2$ (df)	P	Lethal concentration (mg $\times$ mL <sup>-1</sup> )	95% Confidence limits (mg $\times$ mL <sup>-1</sup> )
Anise	2.058 $\pm$ 0.288	57.649 (46)	0.116	LC <sub>1</sub> = 0.606	0.212–1.065
				LC <sub>10</sub> = 1.949	1.127–2.693
				LC <sub>30</sub> = 4.547	3.450–5.772
Fennel	1.000 $\pm$ 0.220	61.942 (47)	0.071	LC <sub>1</sub> = 0.081	0.001–0.354
				LC <sub>10</sub> = 0.903	0.124–1.862
				LC <sub>30</sub> = 5.166	2.931–8.673
Garlic	1.368 $\pm$ 0.194	62.340 (47)	0.066	LC <sub>1</sub> = 0.065	0.011–0.159
				LC <sub>10</sub> = 0.375	0.149–0.628
				LC <sub>30</sub> = 1.340	0.856–1.899
Lavender	2.271 $\pm$ 0.282	48.430 (38)	0.120	LC <sub>1</sub> = 0.443	0.176–0.755
				LC <sub>10</sub> = 1.277	0.747–1.785
				LC <sub>30</sub> = 2.751	2.013–3.516

Tableau 1 Toxicité de base de quatre huiles essentielles nanoémulsionnées à l'égard des femelles de *Nesidiocaris tenuis* 48 heures après l'application nanoémulsionnées envers les femelles de *Nesidiocaris tenuis* 48 heures après une contact topique

## Effets des EOs sur la fertilité de *Nesidiocaris tenuis*

Il y avait une interaction significative entre "EOs"  $\times$  "Concentration" ( $\chi^2 = 22,25, df=8, p < 0,001$ ), indiquant une réduction plus élevée de la fertilité de *N. tenuis* lorsque la concentration des EOs augmentait. Pour toutes les EOs, la réduction de la fertilité était plus élevée à la LC30 (progéniture/femelle de 1,33, 1,25, 1,20 et 1,36 pour les EOs d'anis, d'ail, de fenouil et de lavande, respectivement ; tandis que la progéniture du témoin non traité était de 7,89) par rapport à la LC1 et à la LC10 (progéniture/femelle de 3,42, 2,33, 2,25 et 2,78 à la LC1 et de 3,78 à la LC1 2,78 à la LC10 et 3,00, 3,73, 3,06 et 2,93 à la LC10 pour les EOs d'anis, d'ail, de fenouil et de lavande, respectivement). Dans les trois concentrations trois concentrations, les traitements aux EOs ont réduit de façon significative la fertilité des femelles de *N. tenuis* par rapport au témoin non traité (progéniture). Le témoin non traité (progéniture/femelle de 7,35, 8,17 et 7,89 pour les tests dans les limites de la LC1, LC10 et LC30) (Fig. 1).

## Effets des EOs sur l'orientation de *Nesidiocaris tenuis*

Dans le témoin non traité, les femelles de *N. tenuis* ont montré une attirance significante vers les plantes de sésame plutôt que vers l'air pur. À l'inverse, les trois concentrations estimées faiblement létales des EOs de lavande, de fenouil et d'ail ont affecté l'attraction des femelles *N. tenuis* vers les plants de sésame, n'entraînant aucune différence dans les choix entre le sésame et l'air pur. La capacité d'orientation des femelles *N. tenuis* vaporisées d'EOs d'anis n'a été affectée qu'à sa LC30 (Fig. 2). Le temps passé par les femelles *N. tenuis* pour choisir entre les sources d'odeur a également été affecté de manière significative par les EOs à la LC1 ( $\chi^2 = 16,29, df=4, p < 0,001$ ) et à la LC10 ( $\chi^2 = 12,23, df=4, p = 0,002$ ). Les femelles de *Nesidiocaris tenuis* traitées avec l'EOs d'ail ont significativement passé plus de temps pour choisir par rapport aux insectes non traités. En LC30, toutes les EOs ont augmenté le temps passé par les insectes pour faire un choix par rapport aux insectes non traités, à l'exception de l'EO d'anis ( $\chi^2 = 28,92, df=4, p < 0,001$ ). Pour chaque EOs, le temps passé par les femelles *N. tenuis* à faire un choix n'a pas été affecté par la concentration pour l'anis ( $\chi^2 = 2,25, df= 2, p = 0,320$ ), l'ail ( $f = 1,24, df=2, p = 0,540$ ) et le fenouil ( $\chi^2 = 4,64, df= 2, p = 0,100$ ) ; Cependant, pour la lavande, une augmentation a été observée à LC30 par rapport à LC1 ( $\chi^2 = 6,04, df= 2, p = 0,040$ ) (Fig. 3). Néanmoins, aucune interaction entre les EOs et leurs concentrations n'a été mise en évidence dans le temps de choix de *N. tenuis* entre les deux sources d'odeur ( $\chi^2 = 9,39, df= 8, p = 0,310$ ).

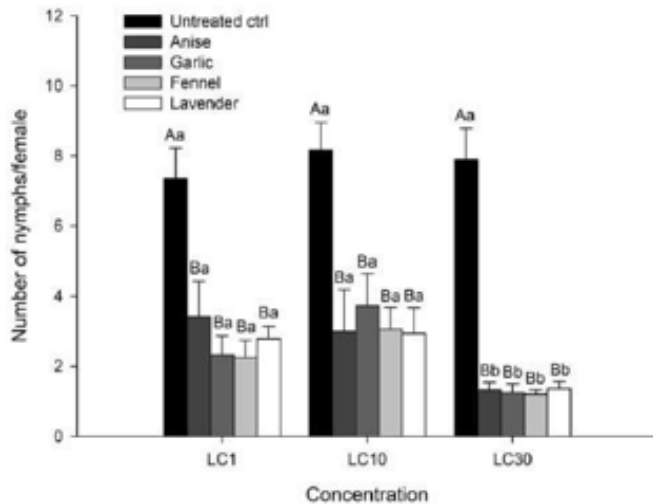


Fig. 1 Nombre moyen ( $\pm$ SE) de nymphes générées par les femelles de *Nesidiocoris tenuis* pendant trois jours après une exposition topique aux huiles essentielles d'anis, de fenouil, d'ail et de lavande à trois concentrations faiblement létales (LC1, LC10 et LC30). Des lettres majuscules différentes indiquent des différences significantes entre les traitements au niveau de la concentration, tandis que des lettres minuscules différentes indiquent des différences significantes dans les concentrations pour un traitement (distribution GLM-Poisson, test HSD de Thkey  $P \leq 0,05$ ).

## Discussion

L'intérêt des EOs en tant qu'outils de lutte contre les nuisibles a augmenté au cours des dernières décennies. Ces composés sont considérés comme écologiques, avec un faible impact sur l'environnement et une faible toxicité pour les manuels. Les EOs dérivées de plantes d'espèces différentes ont été étudiées en combinaison avec différentes technologies de formulation pour obtenir des produits phytopharmaceutiques plus stables et efficaces, afin d'être incorporés dans les programmes de lutte contre les ravageurs (Campolo et al. 2017 ; 2020a). Dans notre expérience, nous avons trouvé différents niveaux de toxicité causés par les EOs envers le comportement (orientation) et la physiologie (reproduction) de *N. tenuis*. Parmi les EOs testées, l'EO d'ail était le composé le plus toxique avec les plus faibles concentrations létales estimées. Elle a également eu un effet négatif sur la progéniture produite par les femelles de *N. tenuis*. De plus, les trois CL testées de l'EO d'ail ont altéré la capacité d'orientation de *N. tenuis* puisque le prédateur a passé significativement plus de temps et qu'il n'a pas été capable de distinguer entre une source d'odeur attractive et non attractive. Bien que les propriétés insecticides de l'ail EO et des insecticides de l'ail EO ont été largement reconnues pour de nombreux insectes nuisibles (Regnault-Roger 1997 ; Ricupero et al. 2022) et plusieurs formulations commerciales sont actuellement commercialisées dans différents pays du monde (Anwar et al. 2014), au meilleur de notre connaissance, nous avons rapporté pour la toute première fois l'effet secondaire de l'ail EO sur le comportement d'un prédateur miride zoophytophage. La forte toxicité enregistrée pour l'EO d'ail peut être attribuée à sa composition constituée à plus de 90% d'organosulfides. Plusieurs études rapportent la toxicité aiguë et les effets sublétaux de l'EO d'ail et de ses composants sur différents stades de développement des arthropodes nuisibles (Ho et al. 1996 ; Meriga et al. 2012 ; Yang et al. 2012 ; Plata-Rueda et al. 2017). La même EO d'ail nano mulsionn e de l'étude actuelle aux concentrations de 0,12 et 3 % s'est avérée efficace pour contrôler *T. absoluta* mais a réduit la fertilité de *N. tenuis*, bien qu'une faible mortalité du prédateur se soit produite (Ricupero et al. 2022). La différence dans la toxicité des OE pourrait être liée aux différentes voies d'exposition, c'est-à-dire le contact topique dans la présente étude, alors que précédemment le résidu sec était la voie d'exposition. Inversement, bien que l'application topique de doses sublétales d'extrait d'ail a perturbé certains paramètres de la table de reproduction de l'insecte prédateur *Padisus maculiventris* (Say) (Hemiptera : Pentatomidae), ce composé a été considéré comme un produit botanique sûr lorsque le prédateur joue un rôle clé dans la lutte contre les ravageurs (Mamduh et al. 2017). Dans ce cas, les différentes concentrations et/ou les divers composés présents dans les différents types

d'extraits d'ail pourraient être liés au changement de toxicité. L'EOs d'anis a montré les LC les plus élevées (toxicité plus faible) parmi les EO testées mais a diminué la fertilité et la capacité d'orientation de *N. tenuis*, à l'exception de la LC10, et de la LC1, pour la réponse olfactive du prédateur. La toxicité aiguë de l'EO d'anis sur *N. tenuis* pourrait être due à la forte proportion de phénylpropanoïdes, l'anéthole et l'estragole constituant environ 80% de la composition de l'huile. Les effets toxiques de l'EO d'anis dans la littérature comprennent l'augmentation de la mortalité de *Tribalium castaneum* (Herbst) (Coleoptera : Tenebrionidae), la réduction de la progéniture à des concentrations croissantes, des irritations et des dommages à différentes parties du corps, y compris les cellules de l'intestin moyen, ce qui était probablement dû à une augmentation de la mortalité. L'intestin moyen, ce qui était probablement dû à sa lipophilie (Hashem et al. 2018). Une toxicité aiguë et un pouvoir répulsif similaires contre *Tribolium cunfurum* ont été enregistrées pour l'EOs d'anis nanoémulsionnée délivrée par aérosol froid et par gel lors d'essais en laboratoire (Palermo et al., 2018). Des essais en laboratoire (Palermo et al. 2021). À l'inverse, en testant l'EOs d'anis en laboratoire, Benelli et al. (2018) ont détecté une toxicité rare et nulle sur les larves et les adultes du prédateur de pucerons *Harmonia axyridis* (Pallas), (Coleoptera:Coccinellidae), respectivement. Parmi les EO évaluées dans cette expérience, l'application topique de l'EOs de lavande a montré une toxicité intermédiaire envers *N. tenuis*, entraînant une réduction de la progéniture et un effet négatif sur son orientation lors du test biologique olfactif. La toxicité de l'EOs de lavande a été démontrée en laboratoire par application topique sur plusieurs ravageurs agricoles et vétérinaires, notamment des hémiptères (Faraone et al. 2015 ; Grul'ovamet al. 2017) et des diptères (Shalaby et al. 2016). Amer et al.(2002) ont observé que l'EOs de lavande française diminuait le taux d'oviposition et la consommation de nourriture d'*Amblyseius swirskii* Athias-Henriot (Acari : Phytoseiidae), bien que l'EOs ait été considérée comme moins toxique envers l'acarien prédateur. La toxicité de l'EOs de lavande a été attribuée au linalool (Erland et al. 2015), son composant principal avec une activité reconnue d'inhibition de l'acétylcholinestérase ; le linalool constituait plus de 40% de l'EOs de lavande testée. La toxicité létale sur *N. tenuis* causée par l'EOs de fenouil dans ses LC inférieures était légèrement plus faible par rapport à l'EO d'ail mais plus élevée si on la compare aux EO d'anis et de lavande. Dans nos essais en laboratoire, l'EOs de fenouil a également affecté la production de la progéniture de *N. tenuis* comme cela a également été enregistré pour les autres EO à concentration différente que nous avons testées. En outre, les femelles de *N. tenuis* n'ont pas été en mesure de faire la distinction entre les sources d'odeur attractantes et non attractantes lorsqu'elles ont été traitées par voie topique avec différentes LC d'EOs de fenouil. LC de l'EO de fenouil et elles ont passé plus de temps à choisir sous l'influence de la LC30. Les propriétés insecticides de l'EOs de fenouil ont été reconnues pour leurs effets insecticides contre de nombreux insectes, tels que *Spodoptera littoralis* (Boisduval) (Lepidoptera : Noctuidae), les larves de *Culex quinquefasciatus* Say (Diptera : Culicidae), les adultes de *Musca domestica* Linnaeus (Diptera : Muscidae) (Pavela et al. 2016), notamment *Acyrtosiphon pisum* (Harris) (Hemiptera : Aphididae) et *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera : Aphididae) (Digilio et al. 2008). Pavela (2018) a trouvé que l'EOs de fenouil a montré une toxicité sur *M. persicae*. toxicité sur *M. persicae* dans la gamme de 0,3-3,7 mL X L<sup>-1</sup> mais, ces concentrations n'ont pas eu de mortalité envers le prédateur *H. axyridis*. Le composé le plus présent dans l'EOs de fenouil est le cis-anéthole, un phénylpropanoïde qui peut avoir un effet insecticide. Les phénylpropanoïdes peuvent neutraliser les mécanismes de défense des insectes, c'est-à-dire les P450, les glutathion-S-transférases et les estérases (Jankowska et al. 2018). Le fenouil EO présente également une proportion considérable de monoterpènes (environ 40 %), principalement le lironène et la fenchone. Nous avons donc des raisons de penser que la proportion élevée de phénylpropanoïdes et de monoterpènes était associée aux effets délétères observés sur *N. tenuis* dans la présente expérience. La plupart des EO peuvent potentiellement provoquer des effets comportementaux et physiologiques sur les insectes à une dose donnée, cependant, les effets comportementaux sont plus susceptibles d'être observés à des concentrations inférieures à celles nécessaires pour produire une toxicité aiguë et des effets secondaires sur la physiologie (Isman et Tak 2017). Dans les présents essais biologiques, les EO ont probablement pénétré le tégument de *N. tenuis* en raison du traitement topique, provoquant des effets physiologiques et comportementaux à de faibles concentrations sur la fertilité et l'orientation. Les insectes sains peuvent détecter des composés odorants et chimiosensibles tels que les composés volatils des plantes grâce à des protéines de liaison des



odorants et des protéines chimiosensibles, situées à la périphérie des récepteurs sensoriels, ayant pour fonction de capturer et de transporter les stimuli moléculaires (Picimbon 2005).

Dans notre expérience, nous avons pu observer des femelles *N. tenuis* non traitées fortement attirées par les plantes de sésame, comme cela a été précédemment rapporté (Biondi et al. 2016 ; Passos et al. 2022). Après traitement avec les EOs, même à de très faibles concentrations, l'orientation de *N. tenuis* vers une plante hôte était compromise. Les effets neurotoxiques des EOs pourraient avoir affecté la capacité du prédateur à se guider vers les stimuli. De plus, le traitement direct avec les huiles a pu provoquer une confusion chez l'insecte, car de nombreux composés peuvent interférer avec les protéines responsables de la perception. La persistance des EOs (c'est-à-dire le temps pendant lequel le produit reste biologiquement actif contre les ravageurs après application) est souvent considérée comme faible, bien que des essais field ont montré qu'une seule pulvérisation peut fournir jusqu'à trois semaines de protection, vraisemblablement pour l'effet répulsif des concentrations résiduelles (Isman et al. 2011). La faible persistance des EOs dans l'environnement est due à leur grande volatilité (Hu et Coats 2008 ; Rathore 2017). Les nanotechnologies peuvent améliorer leur stabilité, leur sensibilité à l'oxydation et prévenir leur phytotoxicité (Rathore 2017 ; Isman 2020). En revanche, pour les mirides zoophytopagiques qui peuvent également survivre sur des plantes hôtes telles que *N. tenuis*, la persistance accrue fournie par la nanoformulation peut être nuisible, car les effets délétères des EOs pourraient être prolongés. Le contact avec des concentrations plus faibles est susceptible de se produire dans des conditions de field même lorsque des doses plus élevées d'insecticides sont utilisées, en raison de la dégradation naturelle des composés (Eijaza et al. 2015). Cela peut affecter négativement leur survie, leur développement et leur efficacité en tant qu'agents de lutte biologique (Desneux et al. 2007 ; Soares et al. 2019). En conséquence, une évaluation minutieuse doit être faite avant d'utiliser des EOs en nanoémulsion lorsque la prédation exercée par *N. tenuis* est souhaitable. Cependant, dans les situations où les populations de *N. tenuis* doivent être réduites, c'est-à-dire lorsque les proies manquent et que des dommages sur les plants de tomate peuvent se produire (Castanè et al. 2011), les EOs peuvent être utilisées comme une stratégie de gestion pour atténuer les dommages causés aux plantes par *N. tenuis*. En conclusion, nous avons observé que *N. tenuis* était sensible aux EOs d'anis, de fenouil, d'ail et de lavande, même à de faibles concentrations, car ces composés ont affecté négativement sa fertilité et son comportement d'orientation, les EOs d'ail et de lavande étant les composés les plus nocifs. Par conséquent, l'utilisation de ces EOs doit être soigneusement évaluée en présence de *N. tenuis* car elles pourraient nuire à la capacité du prédateur à exercer efficacement une activité de lutte biologique. De futures études sur la perception olfactive des insectes sous l'influence des EOs par électroantennographie ou analyses du transcriptome sont justifiées pour dévoiler les mécanismes inconnus qui causent des effets néfastes sur le système nerveux des insectes (Campolo et al. 2020b). L'évaluation des paramètres de reproduction du prédateur miride sous l'influence des EOs en combinaison avec des facteurs de stress environnementaux est un autre point à considérer (Ricupero et al. 2020). Enfin, la pulvérisation de ces EOs dans des conditions de field devrait être effectuée afin d'évaluer comment le contrôle biologique fourni par *N. tenuis* est affecté par ces composés. Dans l'ensemble, les EOs sont susceptibles d'être de plus en plus utilisées à l'avenir, ce qui accélérera les changements dans la façon dont la lutte contre les ravageurs est fournie. Pour cette raison, les chercheurs et les décideurs ont donc une opportunité passionnante et stimulante de les utiliser pour améliorer les systèmes IPM dans le monde entier.

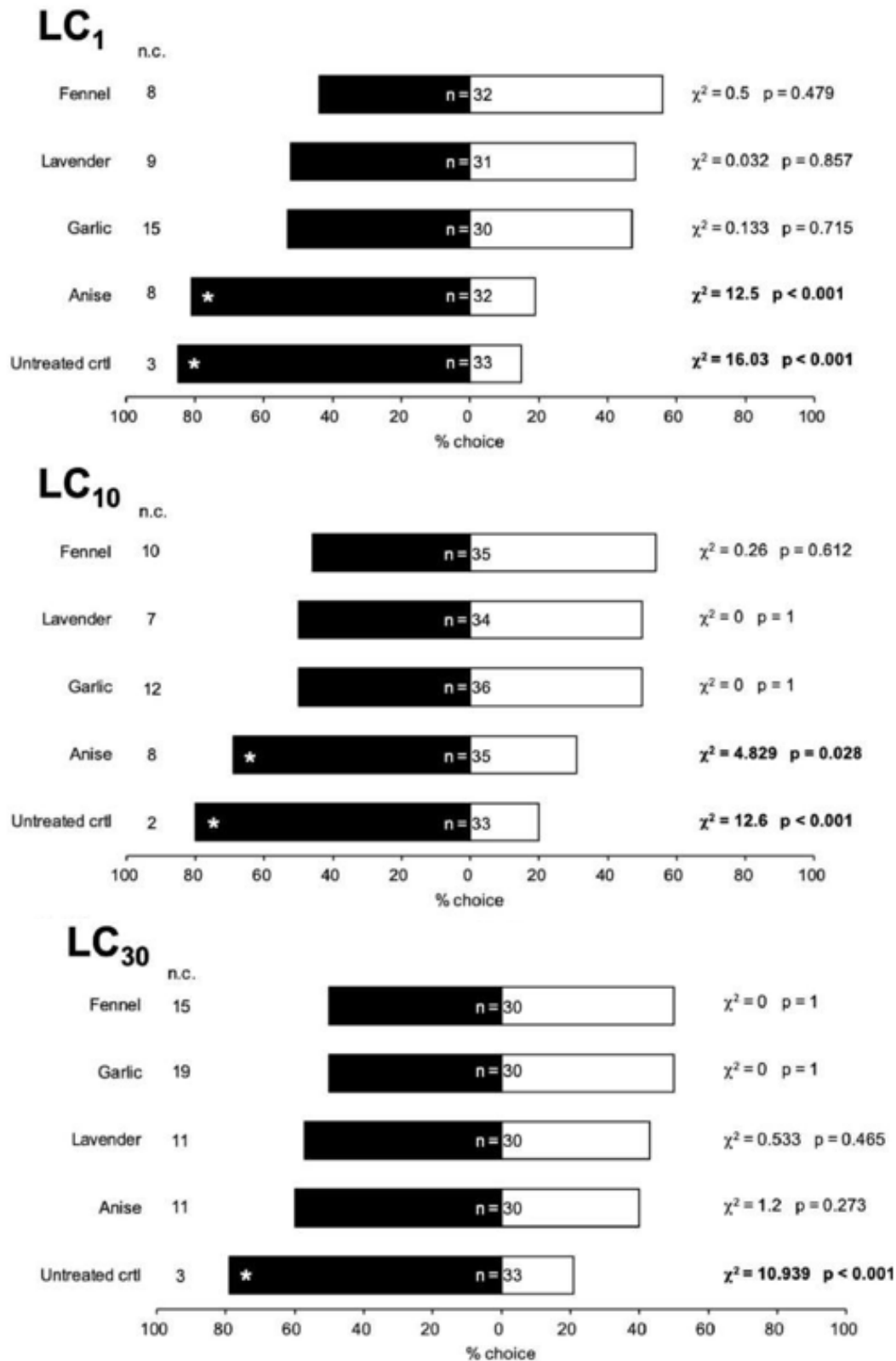


Fig. 2. Réponse olfactive des femelles de *Nesidiocoris reneis* exposées topiquement à des huiles essentielles d'anis, de fenouil, d'ail et de lavande à trois concentrations faiblement létales. (LC1 LC10, et LC30, envers les volatiles émis par *Sesamum indicum* et l'air pur. "n.c." =pas de choix. Indique le nombre de femelles non-répondantes. "n"=N. tenues femelles faisant un choix dans les 5 min d'observations. Les astérisques indiquent des différences significantes dans l'attraction vers la plante *S. indicum* et l'air pur (test du chi carré de vraisemblance  $p \leq 0,05$ ).

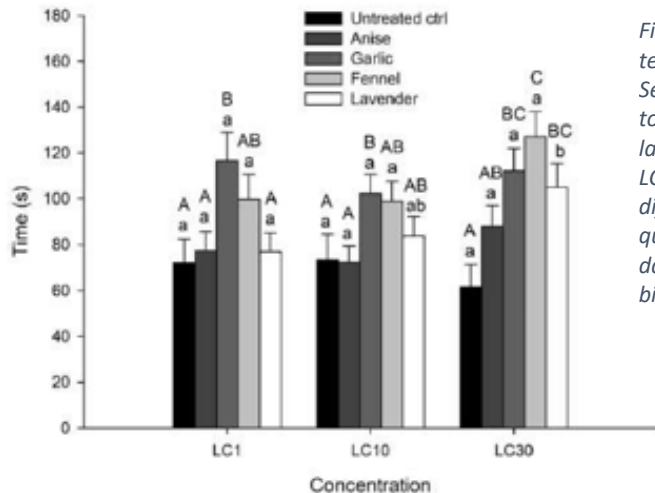


Fig. 3 Temps moyen ( $\pm$ SE) passé (s) par les femelles *Nesidiocoris tenuis* pour choisir entre les volatiles émis par une plante *Sesamum indicum* ou l'air pur après une exposition par contact topique aux huiles essentielles d'anis, de fenouil, d'ail et de lavande à trois concentrations faiblement létales (LC1, LC10 et LC30). Des lettres majuscules différentes indiquent des différences entre les traitements pour une concentration, tandis que des lettres minuscules dilfuées indiquent des différences dans les concentrations pour un traitement (GLM-Distribution binomiale négative, test Tukey HSD.  $p \leq 0,05$ )

## Contributions des auteurs

LCP : a contribué à la conceptualisation, à la méthodologie, à l'exécution des expériences, à la collecte des données, à l'analyse statistique, à l'enquête, à la rédaction ; MR : a contribué à la conceptualisation. d'expériences, collecte de données, analyse statistique, enquête, rédaction ; AG : a contribué à la conceptualisation, à la méthodologie, à la réalisation d'expériences, la collecte de données, l'analyse statistique, l'investigation, la rédaction ; MAS : a contribué à l'analyse statistique, à la rédaction-révision et à l'édition ; ND : a contribué à la conceptualisation, à la rédaction-révision et à l'édition ; OC : a contribué à la conceptualisation, à la rédaction-révision et à l'édition ; GAC : a contribué à la conceptualisation, à la rédaction-révision et à l'édition ; AB : a contribué à la conceptualisation. AB : a contribué à la conceptualisation, à la méthodologie, à la supervision, à la rédaction-révision et à l'édition ; LZ : a contribué à la conceptualisation, à la rédaction-révision et à l'édition, à l'administration du projet. Remerciements Les auteurs tiennent à remercier les propriétaires de l'Azienda Agricola La Zagara (Fiumefreddo, Italie) pour avoir partagé leur récolte de tomates pour la collecte d'insectes. Les étudiants et les techniciens de la section Entomologie appliquée du Département Agriculture. Alimentation et Environnement de l'Université de Catane qui ont contribué à l'exécution des expériences. Financement en accès libre fourni par l'Université de Catane dans le cadre de l'accord CRUI-CARE.

Les auteurs remercient le "Coordenugio de Aprcfeignmento dc Pessoai de Nivcl Superior" (CAPES) pour le financement personnel de l'auteur (PDSE-Process n° 88881187337/2018-O1), le "Fundaeio de Amparo A Pesquisa do. Estado de Minas Gerais" (FAPEMIG) et le "Conselho Nacional de Desenvolvimento Cientifico e Tecnológico" (CNPq) pour le soutien de LCP et GAC ; l'Université de Catania (projet "Emergent Pests and Pathogens and Relative Sustainable St.rategies-5A722192113 ; bourse de doctorat à AG), l'UE, Programme IEV de Coopémction. Transfrontaliere Italie-Tunisie 2014-2020 (Projet INTEMAR-IS\_2.1\_\_O73 innovations clans la lutte intégrée contre les ravageurs el maladies récemmenl introduits sur cultures maxafcheres. Numéro de subvention E64118002460007).

## Déclarations

Intérêts concurrents AB et ND sont rédacteurs en chef de Journal of Pest Science et n'ont pas participé à l'examen ou à la décision du Journal.

Science et n'ont pas participé à l'examen du Journal ou à la décision concernant ce manuscrit, relative à ce manuscrit.

Conflict d'intérêts Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts. AB et ND sont les rédacteurs en chef, et OC est le rédacteur en chef de la revue Journal of Pest Science et n'ont pas participé à l'examen de la

revue ni à la décision concernant cet article, de ce manuscrit, ni dans la décision prise par le journal à son sujet.

Consentement à la publication Non applicable.

Approbation éthique Cet article ne contient pas d'études avec des participants humains ou des animaux (autres que des insectes), humains ou des animaux (autres que des insectes) réalisées par l'un des auteurs.

Accès libre Cet article est publié sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International License, qui permet l'utilisation, le partage, l'adaptation, la distribution et la reproduction dans n'importe quel format, l'utilisation, le partage, l'adaptation, la distribution et la reproduction sur n'importe quel support ou dans n'importe quel format, à condition de citer la source originale, que vous accordiez un crédit approprié à l'auteur ou aux auteurs originaux et à la source, de fournir un lien vers la licence Creative Commons, et d'indiquer si des changements ont été apportés. Les images ou autre matériel de tierce partie dans cet article sont, sont inclus dans la licence Creative Commons de l'article, sauf indication contraire l'article, sauf indication contraire dans la ligne de crédit du matériel, licence Creative Commons de l'article et que l'usage que vous souhaitez en faire n'est pas n'est pas autorisé par la réglementation ou dépasse l'utilisation autorisée, vous devrez vous devrez obtenir l'autorisation directement auprès du détenteur des droits d'auteur. Pour consulter une copie de cette licence, visitez <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

## Références

Amer SAA, Momen FM (2002) Effect of some essential oils on the predacious mite *Amblyseius swirskii* AH (Acari: Phytoseiidae).

Acta Phytopathol Entomol Hung 37:281-286. <https://doi.org/10.1556/APhyt.37,2002.I-3.27>

Anwar A, Groom M, Arbach M, Hamilton C] (2014) How to turn the chemistry of garlic into a 'botanical' pesticide. Recent advances in redox active plant and microbial products. Springer, Dordrecht. PP 323-341. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-8953~0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8953~0_12)

Benelli G, Pavela R, Petrelli R, Cappellacci L, Canale A, Senthil-Nathan S, Maggi F (2018) Not just popular spices! essential oils from *Cuminum cyminum* and *Pimpinella anisum* are toxic to insect pests and vectors without affecting nonlarger invertebrates. IndCrops Prod 124:236-243. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.048>

Biondi A, Guedes RNC, Wan FH, Desneux N (2018) Ecology, world-wide spread, and management of the invasive South American tomato pinworm, *Tum absolum*: past, present, and future.

Annu Rev Entomol 63:239-258. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-031616-034933>

Biondi A, Zappala L, Di Mauro A et al (2016) Can alternative host plant and prey affect phytophagy and biological control by the zoophytophagous mite *Nesidiomyces tenuis*? Biocontrol 61:79-90. <https://doi.org/10.1007/s10526-015-9700-5>

Calvo FJ, Lorente M, Startly PA et al (2012) Preplant release of *Nesidiomyces tenuis* and supplementary tactics for control of *Tuta absoluta* and *Bemisia tabaci* in greenhouse tomato. Entomol Exp Appl 143:211-219. <https://doi.org/10.1111/j.1570e7458.2012.01238.>

- Carnpolo O, Cheri! A, Ricupero M et al (2017) Citrus peel essential oil nanoformulations to control the tomato borer. *Tum absaluta: chemical properties and biological activity*. *Sci Rep* 7113036. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13413-0>
- Campolo O, Giunti G, Laigle M, Michel T, Palmeri V (2020a) Essential oil-based nano-emulsions: Effect of different surfactants, sonication and plant species on physicochemical characteristics. *Ind Crop Prod* 1571112935. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112935>
- Campolo O, Puglisi I, Barbagallo RN et al (2020b) Side effects of two citrus essential oil formulations on a generalist insect predator, plant and soil enzymatic activities. *Chemosphere* 2571127252. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127252>
- Castafié C, Arno J, Gabarra R et al (2011) Plant damage to vegetable crops by zoophytophagous mirid predators. *Biol Control* 59:22–29. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2011.03.007>
- Cherif A, Mansour R, Sun C, Grissa—Lebdi K (2022) Effects of nano and commercial formulations of abamectin on *Tuta absoluta* (Meyrick) and its mirid predators *Macrolophus pygmaeus* and *Neoriviera lenis*. *Intern J Trop Insect Sci*. <https://doi.org/10.1007/s42690-022-00739-0>
- de Oliveira IL, Campos EVR, Bakshi M, Abhilash PC, Fraceto LF (2014) Application of nanotechnology for the encapsulation of botanical insecticides for sustainable agriculture: prospects and promises. *Biotec Adv* 3211550-1561. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2014.10.010>
- Desneux N, Decourtye A, Delpuech JM (2007) The sublethal effects of insecticides on beneficial arthropods. *Annu Rev Entomol* 52:81-106. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.52.110405.091440>
- Desneux N, Han P, Mansour R et al (2021) Integrated pest management of *Tuta absoluta*: practical implementations across different world regions. *J Pest Sci* 95:17-39. <https://doi.org/10.1007/s10340-021-01442-8>
- Digilio MC, Mancini E, Voto E, De Feo V (2008) Insecticide activity of Mediterranean essential oils. *J Plant Interact* 3:17-23. <https://doi.org/10.1080/17429140701843741>
- Dunan L, Malanga T, Bearez P, Benharnou S et al (2021) Biopesticide evaluation from lab to greenhouse scale of essential oils used against *Macrosiphum eupharbiae*. *Agriculture* 11(9):867. <https://doi.org/10.3390/agriculture11090867>
- Eijam S, Khan MF, Malmoud K, Anwar M, Alamgir A, Khalril (2015) Studies on degradation and efficacy of synthetic pesticides on okra crop. *Acad J Entomol* 8: 12-18
- Erland LAE, Rheault MR, Mahmoud SS (2015) Insecticidal and oviposition deterrent effects of essential oils and their constituents against the invasive pest *Drosophila suzukii* (Matsumura) (Diptera: Drosophilidae). *Crop Prot* 78:20-26. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.08.013>
- Faraone N, Hillier NK, Cutler GC (2015) Plant essential oils synergize and antagonize toxicity of different conventional insecticides against *Myzusperricae* (Homoptera: Aphididae). *PLoS ONE* 10:e0127774. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127774>
- Giunti G, Palermo D, Laudani F, Algeri GM, Campolo O, Palmeri V (2019) Repellence and acute toxicity of a nano-emulsion of sweet orange essential oil toward two major stored grain insect pests. *Ind Crop Prod* 142:111869. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111869>
- Grul'ova D, Mudroncekova S, Zheljaskov VD, Salamon I, Rondon SI (2017) Effect of plant essential oils against *Rhopalosiphum padi* on wheat and barley. *Nat Prod Commun* 12: 1517-1520. <https://doi.org/10.1177/1934578X1701200933>

- Hare JD (2011) Ecological role of volatiles produced by plants in response to damage by herbivorous insects. *Annu Rev Entomol* 56:161-180. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120709-14-4753>
- Hashem AS, Awadalla SS, Zayed GM, Maggi F, Benelli G (2018) Pimpinella anisum essential oil nanoemulsions against Tribulium terrestris - insecticidal activity and mode of action. *Environ Sci Pollut Res* 25:18802~18812. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2068-1>
- Ho SH, Koh L, Ma Y, Huang Y, Sim KY (1996) The oil of garlic, Allium sativum L. (Amaryllidaceae), as a potential grain protectant against Tribulium terrestris (L.) and Simulium zelandicum. *Entomol Exp Appl* 81:1-10. [https://doi.org/10.1016/0013-7348\(96\)00018-X](https://doi.org/10.1016/0013-7348(96)00018-X)
- Hu D, Coats J (2008) Evaluation of the environmental fate of thymol and phenethyl propionate in the laboratory. *Pest Manag Sci* 64:775-779. <https://doi.org/10.1002/ps.1555>
- Ingegno BL, Messelink GJ, Leman A, Sacco D, Tavella L (2021) Development and thermal activity thresholds of European mirid predatory bugs. *Biol Control* 152:104423. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104423>
- Isman MB, Miresmailli S, Machial C (2011) Commercial opportunities for pesticides based on plant essential oils in agriculture, industry and consumer products. *Phytochem Rev* 10:197-204. <https://doi.org/10.1007/s11101-010-9170-4>
- Isman MB, Tak JH (2017) Commercialization of insecticides based on plant essential oils: Past, present, and future. In: Nollet LM, Rathore HS (eds) *Green pesticides handbook: Essential oils for pest control*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp 2742. <https://doi.org/10.1201/9781315153131-2>
- Isman MB (2020) Botanical insecticides in the twenty-first century-fulfilling their promise? *Annu Rev Entomol* 65:233-249. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011019-025010>
- Jankowska M, Rogalska J, Wyszowska J, Stankiewicz M (2018) Molecular targets for components of essential oils in the insect nervous system - a review. *Molecules* 23:34. <https://doi.org/10.3390/molecules23010034>
- Kah M, Beulke S, Tiede K, Iloffmann T (2013) Nanopesticides: state of knowledge, environmental fate, and exposure modeling. *Crit Rev Environ Sci Technol* 43:1823-1867. <https://doi.org/10.1080/10643389.2012.671750>
- Kim S, Yoon J, Tak JH (2021) Synergistic mechanism of insecticidal activity in basil and mandarin essential oils against the tobacco cutworm. *J Pest Sci* 94(4):1119-1131. <https://doi.org/10.1007/s10340-021-01345-8>
- Krzyzowski M, Baran B, Lozowski B, Francikowski J (2020) The role of dilution mediums in studies of fumigant insecticidal activity of essential oils. *J Pest Sci* 93:1119-1124. <https://doi.org/10.1007/s10340-020-01241-7>
- Madbouni MAZ, Samih MA, Namvar P, Biondi A (2017) Temperature-dependent functional response of NE. Yldi(COfl.T tennis (Hemiptera:Miridae) to different densities of pupae of cotton whitefly. [Jemiria tabaci (Hemiptera: Aleyrodidae). *Europ Entomol* 114:2325. <https://doi.org/10.14411/ejc.2017.04>
- Mamduh Z, Hosseinaveh V, Allahyari H, Talehi-Jahromi K (2017) Side effects of garlic extract on the life history parameters of the predatory bug. Podisus maculiventris (Say) (Hemiptera: Pentatomidae). *Crop Prot* 100:65-72. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.05.029>
- Mansour R, Biondi A (2021) Releasing natural enemies and applying microbial and botanical pesticides for managing Tuta absoluta in the MENA region. *Phytoparasitica* 49:179-194. <https://doi.org/10.1007/s12600-020-00849-w>
- Maroofpour N, Mousavi M, Hajarizadeh MJ et al (2021) Comparative selectivity of nano and commercial formulations of pirimicarb on a target pest, Brevicoryne brassicae, and its predator Chrysopa carnea. *Ecotoxicology* 30(2):361-372. <https://doi.org/10.1007/s10646-021-02349-x>

- Meriga B, Mopuri R, MuraliKrishna T (2012) Insecticidal, antimicrobial and antioxidant activities of bulb extracts of *Allium sativum*. *Asian Pac J Trop Med* 5:391–395. [https://doi.org/10.1016/S1995-7645\(12\)60065-0](https://doi.org/10.1016/S1995-7645(12)60065-0)
- Miresmailli S, Isman MB (2014) Botanical insecticides inspired by plant-herbivore chemical interactions. *Trends Plant Sci* 19:29-35. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.03.002>
- Moretti MDL, Sanna-Passino G, Demontis S, Bazzoni E (2002) Essential oil formulations useful as a new tool for insect pest control. *AAPS Pharm SciTech* 3:164-74. <https://doi.org/10.1208/pt030213>
- Naselli M, Biondi A, Tropea Garzia G et al (2017) Insights into food webs associated with the South American tomato pinworm. *Pest Manag Sci* 73(7):1352–1357. <https://doi.org/10.1002/ps.4562>
- Palermo D, Giunti G, Laudani F, Palmeri V, Campolo O (2021) Essential oil-based nano-biopesticides: formulation and bioactivity against the confused flour beetle *Tribolium confusum*. *Sustainability* 13:9746. <https://doi.org/10.3390/sul3179746>
- Papadimitiou DM, Pettakis EA, Arvaniti KA et al (2019) Comparative bioactivity of essential oils from two *Merrthia pulegium* (Lamiaceae) chemotypes against *Aphis gossypii*, *Aphis spiraeolae*, *Tetranychus urticae* and the generalist predator *Neriducorir renuir*. *Phytoparasitica* 47:683–692. <https://doi.org/10.1007/s12600-019-00770-x>
- Passos LC, Ricupero M, Gugliuzzo A et al (2022) Does the dose make the poison? Neurotoxic insecticides impair predator orientation and reproduction even at low concentrations. *Pest Manag Sci* 78:1698–1706. <https://doi.org/10.1002/ps.6789>
- Pavela R (2018) Essential oils from *Foeniculum vulgare* Miller as a safe environmental insecticide against the aphid *Myzus persicae* Sulzer. *Environ Sci Pollut Res* 25:10904–10910. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1398-3>
- Pavela R, Zabka M, Bednár J, Tišlta J, Vrchoťová N (2016) New knowledge for yield, composition and insecticidal activity of essential oils obtained from the aerial parts or seeds of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill). *Ind Crop Prod* 83:275-282. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.11.090>
- Pavla R, Morshedlou MR, Mumivand H, Khorsand GJ et al (2020) Phenolic monoterpene-rich essential oils from Apiaceae and Lamiaceae species: insecticidal activity and safety evaluation on non-target earthworms. *Entomol Gen* 40:421-435. <https://doi.org/10.1127/entomologia/2020/113>
- Pérez-Hedo M, Riahi C, Urbaneja A (2021a) Use of zoophytophagous mirid bugs in horticultural crops: current challenges and future perspectives. *Pest Manag Sci* 77:33-42. <https://doi.org/10.1002/ps.6043>
- Pérez-Hedo M, Alonso-Valiente M, Vacas S, Gallego C et al (2021b) Eliciting tomato plant defenses by exposure to herbivore induced plant volatiles. *Entomol Gen* 41(3):209-218. <https://doi.org/10.1127/entomologia/2021/196>
- Picinibon JF (2005) Synthesis of odorant reception-suppressing agents, odorants-binding proteins (OBPs) and chemosensory proteins (CSPs): molecular targets for pest management. In: Regnault—Roger C, Ptilogene BJR, Vincent C (eds) *Biopesticides of plant origin*. Lavoisier. Paris. pp 383-416
- Plata-Rueda A, Martínez LC, Dos Santos MH et al (2017) Insecticidal activity of garlic essential oil and their constituents against the mealworm beetle, *Tenebrio molitor* Linnaeus (Coleoptera: Tenebrionidae). *Sci Rep* 7:14640. <https://doi.org/10.1038/srep46406>
- R Development Core Team (2019) R: A language and environment for statistical computing (Version 3.6.0). R Foundation for Statistical Computing. Vienna. <https://www.t-project.org/>

Rathore LM (2017) Green pesticides for organic farming: occurrence and properties of essential oils for use in pest control. In: Nollet LM, Rathore HS (eds) Green pesticides handbook: essential oils for pest control. CRC Press, Boca Raton, FL. pp 3-26. <https://doi.org/10.1201/9781315153131>

Regnault-Roger C (1997) The potential of botanical essential oils for insect pest control. [Integr Pest Manag Rev 2:25-34. <https://doi.org/10.1023/A:1018472227889>

Regnault-Roger C, Vincent C, Arnason JT (2012) Essential oils in insect control: low-risk products in a high-stakes world. Annu Rev Entomol 57:405-424. <https://doi.org/10.1146/annurev-entomol-10-01-2011-0400554>

Ricupero M, Abbes K, Haddi K et al (2020) Combined thermal and insecticidal stresses on the generalist predator *Macroluphus pygmaeus*. Sci Tot Environ 7291138922. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.1138922>

Ricupero M, Biondi A, Cincotta F et al (2022) Bioactivity and physico-chemistry of garlic essential oil nanoemulsion in tomato. EntomolGen. <https://doi.org/10.1127/entomolgen/2022/1553>

Shalaby HA, El Khateeb RM, El Narnky AH et al (2016) Larvicidal activity of camphor and lavender oils against sheep blowfly, *Lucilia xericara* (Diptera: Calliphoridae). J Parasit Dis 401475-1482. <https://doi.org/10.1007/s12639-015-0715-8>

Siscaro G, Ló Puma C, Trupea Garzia G et al (2019) Temperature and tomato variety influence the development and the plant damage induced by the zoophytophagous mirid bug *Nesidiocoris lenoiri*. J Pest Sci 92:1049–1056. <https://doi.org/10.1007/s10340-019-01096-7>

Sciortino M, Scurria A, Lino C, Pagliam M, D'Agostino F, Tortorici S, Ricupero M, Biondi A, Zappala L, Ciriminna R (2021) Silica—microencapsulated orange oil for sustainable pest control. Adv

Sustain Syst 5:2000280. <https://doi.org/10.1002/nds.202000280> Soares MA, Campos MR, Passos LC et al (2019) Botanical insecticide and natural enemies: a potential combination for pest management against *Tuta absoluta*. J Pest Sci 92:1433–1443. <https://doi.org/10.1007/s10340-018-01174-5>

Thomine E, Jeavons E, Rusch A, Beatez P, Desneux N (2020) Effect of crop diversity on predation activity and population dynamics of the mirid predator *Nesidiocoris tenuis*. J Pest Sci 93(4): 1255–1265. <https://doi.org/10.1007/s10340-020-01222-w>

Tortorici S, Cimino C, Ricupero M et al (2022) Nanostructured lipid carriers of essential oils as potential tools for the sustainable control of insect pests. Ind Crops Prod 181:1–14766.

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114766> van Lenteren JC, Lanzoni A, Hämmerik L et al (2021) The pest kill rate of thirteen natural enemies as aggregate evaluation criterion of their biological control potential on *Tuta absoluta*. Sci Rep 11:1-13. <https://doi.org/10.1038/541598-021-90034-8>

Walling LL (2000) The myriad plant responses to herbivores. J Plant Growth Regul 19:195-216. <https://doi.org/10.1007/s003440010026>

Yang FL, Zhu F, Lei CL (2012) Insecticidal activities of garlic substances against adults of grain moth, *Sitotroga cerealella* (Lepidoptera: Gelechiidae). Insect Sci 19:205-212. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7917.2011.01446.x>

Zappala L, Binndi A, Alma A et al (2013) 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(4):635-647. <https://doi.org/10.1007/s10340-013-0531-9>

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.





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